

Simulação biomecânica da gaguez

David José Pinto Nogueira

Dissertação do MIEM

Orientador: Renato Manuel Natal Jorge

Coorientadores: Sofia Brandão



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Janeiro de 2016

“Dark times lie ahead of us and there will be a time when we must
choose between what is easy and what is right.
-Albus Dumbledore”

J.K.Rowling

Resumo

A evolução tecnológica permitiu que áreas como Engenharia e Medicina se aproximassem, levando a que certos fenómenos possam ser estudados por via de modelação computacional chegando a conclusões até aqui desconhecidas.

Esta dissertação tem como objetivo melhorar a compreensão do fenómeno da gaguez. Para isso foram obtidas imagens médicas, através de tomografias computadorizadas e ressonâncias magnéticas, de um indivíduo com gaguez em três situações diferentes, em repouso e a produzir os fonemas “A” e “P”.

Estas imagens foram trabalhadas com a ajuda dos softwares MIMICS e 3-MaticSTL, permitindo criar modelos a três dimensões das estruturas de maior interesse na produção da fala. As estruturas modeladas foram: maxilar, cartilagem tiroideia, cartilagem cricoide, osso hióide, palato mole, língua, cordas vocais e epiglote.

Os modelos da produção de fonemas foram comparados com o modelo em repouso de forma a garantir a integridade da análise final. Esta comparação foi feita a nível do volume das estruturas e da sua área superficial.

O objetivo seria solicitar o modelo em repouso por forma a atingir os modelos onde o paciente está a produzir fonemas, no entanto não foi possível chegar tão longe. Isto deve-se ao facto de a análise feita aos modelos mostrar que eles não estavam corretamente obtidos e a sua análise apenas traria resultados falaciosos.

Apesar de não ser possível fazer a análise por elementos finitos verificou-se que até com os modelos errados é possível verificar alterações em estruturas que poderiam ter interesse no fenómeno da gaguez. Além disso foi ainda feita uma análise dos erros e das soluções que podem ser implementadas para continuar este estudo e obter resultados satisfatórios.

Biomechanical simulation of stuttering

Abstract

Technological evolution has allowed fields of study like Medicine and Engineering to come closer, this leads on to the possibility to study some phenomena to be study using computer analysis, reaching conclusions unknown until this now.

The goal of this paper is to improve the knowledge of the stuttering phenomenon. To do so it were obtained medical images, using TC and RM, of a person that suffer from stuttering in three different situations: at rest and producing the phonemes “A” and “P”.

With the help of the software MIMICS and 3-MaticSTL this images were used to allow the creation of three dimension models of the anatomical structures involved in speech. The modulated structures were: jaw, hyoid bone, tongue, vocal cords, glottis, thyroid cartilage, cricoid cartilage and palate.

The models of the production of phonemes were compared to the model in rest allowing to ensure the integrity of the final study. This comparison was made at the volume and surface area level.

The goal should be to apply forces to the model in rest until it was reached the models were the patient is producing phonemes, but it was impossible to get to that point. The cause to this is the results obtained with the analysis made to the models, that showed that these models were not correctly obtained and the study made from them would only lead to bad and not trustworthy results.

Although it wasn't possible to make the finite element analysis it could be observed that even with incorrect models it was possible to see some changes in the structures, changes that could be of interest to the study of the stuttering phenomenon. Beside this it was also made a study of the errors that could be committed and the solutions that can be implemented to, in the future, obtain better results.

Agradecimentos

Devo um agradecimento especial ao meu orientador, Professor Renato Natal Jorge, pela paciência mostrada e pelo apoio constante. Sem a sua orientação este trabalho não seria possível. Além de toda a ajuda neste trabalho, os seus conselhos e explicações permitiram uma evolução constante no meu processo de aprendizagem.

À minha coorientadora, Sofia Brandão, quero agradecer toda a ajuda, com uma especial atenção à paciência mostrada quando se tratava de me explicar temas relacionados com anatomia.

Ao Marco Marques, pela constante disponibilidade e por todos os ensinamentos relativos aos Softwares utilizados.

À terapeuta da fala Rute Fernandes pela constante ajuda em temas associados à gaguez e ao seu tratamento.

À minha mãe por possibilitar que eu chegasse a este patamar e por suportar os meus devaneios quando mais ninguém o fazia.

A todos os meus amigos, quer àqueles que durante cinco anos me apoiaram em todos os momentos do meu percurso académico, quer àqueles que permitiram que a minha vida fosse mais do que apenas a faculdade. A eles devo ainda um agradecimento por proporcionarem alegrias e algumas tristezas, pelo carinho que sempre me deram e por me fazerem sentir útil e por me tornarem uma pessoa melhor.

Em último quero agradecer à minha namorada, não só pela sua imensa paciência mas também por ser a minha maior força e me fazer acreditar que todos os obstáculos podem ser conquistados.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	2
1.1	- Objetivos da dissertação	2
1.2	- Estrutura da dissertação.....	4
2	Produção da fala	5
2.1	- Voz normal	6
2.2	- Respiração	7
2.3	- Fonação, ressonância e articulação.....	8
2.4	- Teoria da produção de voz e fala	12
2.5	- Parâmetros vocais.....	13
2.5.1	- Frequência	14
2.5.2	- Amplitude	15
2.5.3	- Qualidade.....	16
2.5.4	- Outros	17
3	O cérebro e a fala.....	18
3.1	- Preparação da praxia verbal	19
3.2	- Preparação do movimento	20
3.3	- Desencadear do movimento.....	21
3.4	- Movimento orofacial	23
3.5	- Coordenação de movimentos.....	24
3.6	- <i>Audiofeedback</i>	25
4	Patologias do trato vocal	26
4.1	- Principais causas de disfonias.....	27
4.2	- Patologias e a Gaguez	29
5	Gaguez.....	30
5.1	- Causas da gaguez.....	31
5.2	- Tipos de gaguez.....	32
5.3	- Estados de desenvolvimento da gaguez.....	33
5.3.1	- Estado 1 – Disfluência normal.....	34
5.3.2	- Estado 2 – Fronteira com a gaguez	35
5.3.3	- Estado 3 – Começo da gaguez	36
5.3.4	- Estado 4 – Gaguez intermédia.....	37
5.3.5	- Estado 5 – Gaguez avançada	38
5.4	- Auto-conceito de gago.....	39
5.5	- Problemas na análise de um indivíduo gago.....	40
5.6	- Tratamento da gaguez	41
6	Avaliação do trato vocal	42
6.1	- Tomografia computadorizada.....	43
6.2	- Ressonância magnética	44
7	- Estudo biomecânico.....	45
7.1	- Estado da arte	46

7.2 - Software MIMICS	47
7.2.1 – Utilização do MIMICS	48
7.3 - Software 3-MaticSTL	51
7.4 - Imagens usadas	52
7.4.1 – Uso de RM e TC.....	53
7.5 - Verificação dos modelos obtidos	54
7.5.1 – Verificação usando o volume.....	55
7.5.2 – Verificação usando a área superficial.....	57
7.5.3 – Causas para os erros encontrados.....	58
7.6 - Análise final dos modelos obtidos	60
8 Conclusões e trabalhos futuros.....	61
9 Bibliografia.....	64

Índice de Figuras

Figura 1 - Ilustração do osso hióide	8
Figura 2 - Ilustração das cartilagens presentes na laringe	9
Figura 3 - Ilustração dos ligamentos e membranas da laringe	10
Figura 4 - Ilustração dos músculos em questão	10
Figura 5 - Pregas vocais partindo de uma posição de encerramento, passando por uma fase de abertura e voltando a estar encerradas	11
Figura 6 - Esquema da produção de voz à luz da Teoria de Fonte – Filtro	12
Figura 7 - Ilustração da preparação da praxia num indivíduo não gago	19
Figura 8 - Ilustração da preparação da praxia num indivíduo gago	19
Figura 9 - Ilustração da preparação do movimento num indivíduo não gago	20
Figura 10 - Ilustração da preparação do movimento num indivíduo gago	20
Figura 11 - Ilustração do desencadear do movimento em indivíduos não gagos	21
Figura 12 - Ilustração do desencadear do movimento em indivíduos gagos	22
Figura 13 - Ilustração do movimento orofacial em não gagos	23
Figura 14 - Ilustração do movimento orofacial em gagos	23
Figura 15 - Ilustração da coordenação de movimentos em não gagos	24
Figura 16 - Ilustração da coordenação de movimentos em gagos	24
Figura 17 - Ilustração do audiofeedback em não gagos	25
Figura 18 - Ilustração do audiofeedback em gagos	25
Figura 19 - Imagem de nódulos das cordas vocais	27
Figura 20 - Cordas vocais inchadas devido a um edema de Reinke	27
Figura 21 - A- cordas vocais com sulcos; B- Cordas vocais com pontes mucosas	28
Figura 22 - A- Cordas vocais com um pólip; B- Cordas vocais com um tumor	28
Figura 23 - Máquina tipo onde se realizam TAC	43
Figura 24 - Exemplo da imagem obtida através de uma TC ao pescoço	43
Figura 25 - Ilustração dos planos Sagital, Coronal e Axial	44
Figura 26 - Exemplo das imagens obtidas, nos três planos ortogonais (sagital, coronal e axial) de um exame de RM	44
Figura 27 - A - Imagem inicial, B- Segmentação, C- Modelo 3D do osso hióide	47
Figura 28 - Identificação do Osso Hióide nas imagens médicas	48
Figura 29 - Criação de uma máscara que inclua o osso hióide usando threshold	48
Figura 30 - Criação de uma nova máscara apenas com o Osso Hióide usando Region Growing	49

Figura 31 - Imagem que mostra falhas na máscara criada de modo automático.....	49
Figura 32 - Modelo sólido do Osso Hióide criado através do Software MIMICS	50
Figura 33 - A)Modelo da cartilagem tiroideia obtido usando o MIMICS; B) o mesmo modelo após a utilização do 3-MaticSTL.....	51
Figura 34 - Exemplo de um artefacto de movimento encontrado onde parecem existir dois ossos hióide	58
Figura 35 - Imagem ilustrativa da diferença de resulação nos diferentes planos de uma RM .	59

Índice de tabelas

Tabela 1 - Estruturas e funções mais importantes para a produção de voz [1]	6
Tabela 2 - Parâmetros vocais e parâmetros usados para os avaliar	13
Tabela 3 - Valor da frequência fundamental média da voz no ser Humano	14
Tabela 4 - Comparação de volume entre as estruturas em repouso e em produção de fonemas	55
Tabela 5 -Comparação de área superficial entre as estruturas em repouso e em produção de fonemas.....	57

1 Introdução

1.1 - Objetivos da dissertação

A presente dissertação de mestrado foi realizada no âmbito do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de engenharia da Universidade do Porto, especialização em Projeto e construção Mecânica e tem por objetivo o estudo biomecânico da gaguez.

A produção de fala é algo muito importante na vida do ser Humano, no entanto pela facilidade com que o fazemos por norma nem sequer nos apercebemos da sua importância. Na realidade a fala envolve todo um processo extremamente complicado onde entram várias estruturas anatómicas comandadas pelo cérebro e é a ferramenta mais utilizada no dia-a-dia para transmitir informação e nos relacionar-nos com outros indivíduos.

Sujeitos que apresentem gaguez vêm estas tarefas dificultadas por algo que está fora do seu controlo. Este fenómeno pode trazer consequências graves para a vida dos mesmos, sendo que muitos alteram os seus planos futuros de acordo com a patologia e podem mesmo entrar em estados de depressão irreversível.

A gravidade deste problema levou à necessidade de se estudar o fenómeno da gaguez com maior detalhe e aí surgiu a opção de fazer a análise biomecânica da mesma.

Para iniciar esta análise foi feita uma pesquisa intensiva sobre a gaguez de onde se tiraram informações como as principais causas e tratamentos e as estruturas envolvidas na produção da fala e como estas se relacionam.

Em seguida foram obtidas imagens médicas de um paciente com gaguez em repouso e a produzir os fonemas “A” e “P”, sendo o principal objetivo criar modelos a três dimensões nestas situações, permitindo depois solicitar o modelo em repouso de forma a obter os modelos da produção de fonemas, levando assim à avaliação de onde são feitos esforços e de como se comportam estas estruturas face aos mesmos.

Os modelos foram criados utilizando o software Mimics e refinados usando o software 3-MaticSTL.

Depois de obtidos os modelos foram comparados entre si, permitindo assim garantir a integridade e a validade de um estudo onde estes seriam relacionados. Foi então realizado um estudo comparativo entre as estruturas nos três estados, onde foram analisados os seus volumes e as suas áreas superficiais.

Esta análise revelou que a integridade dos modelos não se mantinha de estado para estado tornando o estudo por elementos finitos impossível, uma vez que apenas iria produzir resultados falaciosos.

No entanto sendo este um projeto pioneiro o encontro de obstáculos foi sempre esperado e foram então analisados os erros cometidos e como os contornar de forma a permitir que trabalhos futuros alcancem resultados corretos e conclusões que beneficiem todas as pessoas que sofrem de gaguez.

1.2 - Estrutura da dissertação

O estudo que aqui é apresentado encontra-se dividido em duas partes principais: pesquisas bibliográficas sobre os fundamentos da gaguez e a modelação de estruturas e análise das mesmas.

A primeira parte contém toda a informação necessária para se compreender o fenómeno da gaguez, a sua utilidade é imensa para qualquer pessoa que pretenda estudar o assunto.

No capítulo 2 é abordada a produção da fala, desde as estruturas envolvidas e as suas funções até à noção de voz normal.

No capítulo 3 é explicado o papel que o cérebro desempenha na produção de voz em indivíduos com e sem gaguez.

No capítulo 4 são referidas algumas patologias do trato vocal e a interação que estas podem ter com o fenómeno da gaguez.

No capítulo 5 foi feita uma análise ao desenvolvimento da gaguez e das complicações que traz consigo no decorrer da vida de um ser humano.

No capítulo 6 é feita uma pequena explicação de como foram obtidas as imagens médicas utilizadas no decorrer deste estudo.

A segunda parte deste trabalho possui toda a informação sobre a criação dos modelos, a sua refinação e a verificação da sua integridade. Possui ainda uma análise de causas de erros e de como estes podem ser evitados em trabalhos futuros. Todos estes detalhes encontram-se no capítulo 7 deste trabalho.

Para finalizar no capítulo 8 temos as conclusões obtidas ao longo de todo este trabalho bem como alguns trabalhos futuros que teriam o maior interesse em serem realizados.

2 Produção da fala

Para melhor compreender todos os processos envolvidos na gaguez é necessário perceber todo o envolvimento de estruturas anatómicas que levam à produção da voz. Serão, por isso, aqui apresentadas, de forma detalhada, as várias estruturas envolvidas e as suas funções.

A voz é um instrumento muito precioso para o ser humano, é através dela que conseguimos comunicar e expressar sentimentos que de outra forma seriam dificilmente compreendidos. Ela está, de uma forma íntima, ligada à personalidade de cada um e reflete a individualidade fisiológica e psicológica do orador.

Como é do conhecimento geral a voz pode indicar, ao ouvinte, o estado de espírito do orador. Por vezes, a maneira como o orador diz algo, reflete melhor a mensagem do que aquilo que é dito. Isto deve-se ao facto de ser possível dotar a voz das mais diversas entoações, o que a torna um instrumento muito poderoso. [1]

2.1 - Voz normal

A voz normal é uma referência para ser usada como padrão. Esta é avaliada de forma qualitativa, sendo que várias vozes diferentes podem ser consideradas “normais”.

Uma voz diz-se normal se a sua altura tonal for adequada ao gênero e idade do orador, se a intensidade se adequar ao ambiente, se tiver uma qualidade agradável, desprovida de ruídos e se apresentar flexibilidade para produzir expressões de ênfase, significado e subtilezas.

Esta voz é atingida através de uma interação de diversos órgãos, nomeadamente pulmões, laringe, faringe, cavidade oral, cavidade nasal, língua, lábios, dentes e palato. Estes órgãos não têm como função primária a produção de voz, mas sim outras como a deglutição, respiração e mastigação. No entanto todos possuem funções secundárias imprescindíveis para a voz: fonação, ressonância e articulação. É de notar que a respiração é também bastante importante para a produção de voz.

A tabela que se segue descreve as estruturas e as funções mais importantes para a produção de voz.

Função	Órgão	Atividade	Agentes Principais	Produto
Compressor	Vias aéreas inferiores	Respiração	Músculos do abdómen e diafragma	Pressão de ar
Oscilador (fonte)	Laringe	Fonação	Músculos laríngeos e aerodinâmica	Fonte vocal
Ressoador (filtro)	Trato vocal	Articulação	Músculos da faringe, véu palatino, mandíbula, língua e lábios	Voz

Tabela 1 - Estruturas e funções mais importantes para a produção de voz [1]

2.2 - Respiração

Tal como referido anteriormente, uma função secundária da respiração é a produção de voz. É através da respiração que o corpo procede à ventilação, passo imprescindível para a produção de voz.

É do conhecimento geral que é durante a expiração que se dá a produção do som, na realidade quer em funções de fala como de canto, é esperado que a expiração mantenha um fluxo de ar constante, o que permitirá vencer a resistência que a glote oferece, proporcionando a força aerodinâmica para a fonação.

A respiração acontece graças à intervenção de vários músculos, órgãos e ossos. No entanto a análise desses movimentos não é muito relevante para a questão aqui em estudo, pelo que não serão aprofundados. Por sua vez torna-se relevante entender que as capacidades pulmonares e o tipo de respiração variam de pessoa para pessoa, sendo que, por si só, isto não apresente um problema para o indivíduo em questão, uma vez que todos os tipos de respiração podem produzir vozes “normais”. No entanto o entendimento destas diferenças vem ajudar a perceber a dificuldade no tratamento da gaguez, pois incluem um número acrescido de variáveis que precisam ser tidas em conta.

2.3 - Fonação, ressonância e articulação

O principal interveniente nas funções de fonação, ressonância e articulação é a laringe, estrutura que por isso será estudada com maior detalhe.

A laringe é constituída pelo osso hióide, cartilagens, ligamentos e por músculos intrínsecos e extrínsecos.

O osso hióide é o único osso do corpo humano que não se encontra ligado a outro, apresenta uma forma em U e é responsável pela ligação entre a língua e as estruturas laríngeas.

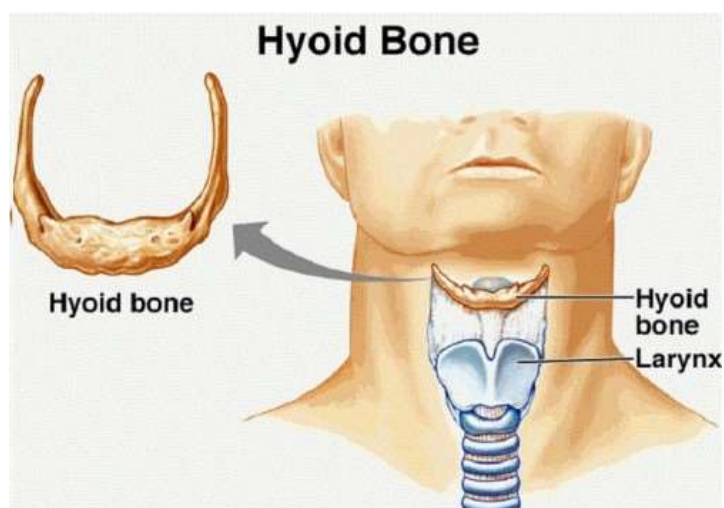


Figura 1 - Ilustração do osso hióide

Ao todo a laringe possui nove cartilagens que podem ser agrupadas em seis grupos. São elas a Epiglote (A), a Tiróide (B), a Cricóide (C), duas Aritenóides (D), duas Corniculadas (E) e duas Cuneiformes. As imagens que se seguem têm o objetivo de facilitar a compreensão do posicionamento das mesmas.

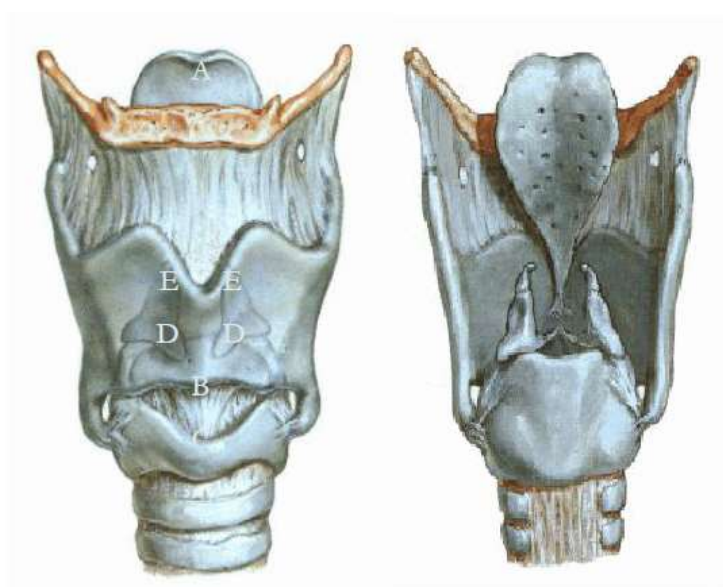


Figura 2 -Ilustração das cartilagens presentes na laringe

A laringe possui as seguintes membranas e ligamentos: a membrana tiro-hiódea (A), ligamento hioepiglótico (B), ligamento tiroepiglótico (C), ligamento vocal (D) e ligamento cricotiroideo (E).

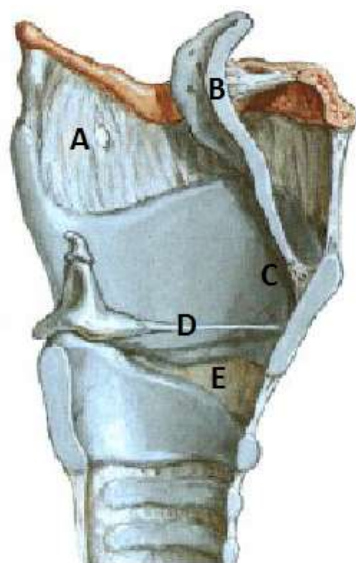


Figura 3 - Ilustração dos ligamentos e membranas da laringe

Não é tão importante visualizar o posicionamento, extremamente complexo destes músculos como é perceber a sua função. Estes músculos são os responsáveis pelo controle das estruturas que até agora têm sido apresentadas, são eles que permitem o correto funcionamento da laringe, movendo ligamentos e cartilagens até às posições que estes devem tomar durante o uso da laringe.

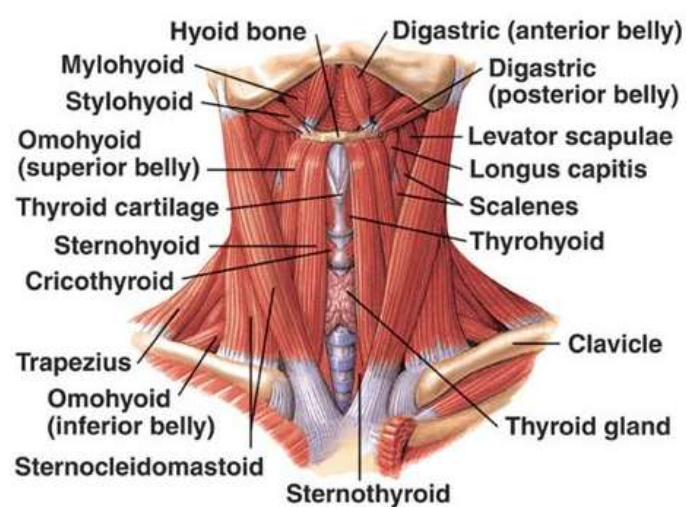


Figura 4 - Ilustração dos músculos em questão

Devido à sua importância na produção da fala tona-se ainda importante falar das pregas vocais. Estas são estruturas que, por ação de forças aerodinâmicas e forças elásticas dos tecidos, vibram, contribuindo assim para a fonação.

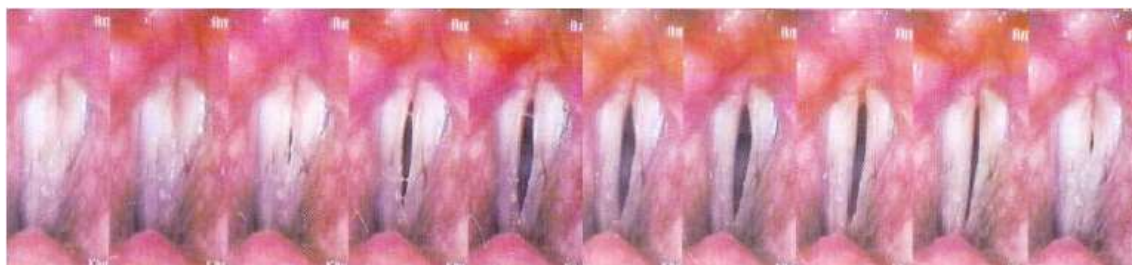


Figura 5 - Pregas vocais partindo de uma posição de encerramento, passando por uma fase de abertura e voltando a estar encerradas

2.4 - Teoria da produção de voz e fala

Existem diversas teorias de produção de voz, sendo que todas se baseiam nos mesmos princípios mas explicam os fenómenos de produção de som através de linguagens diferentes. Neste trabalho usaremos a Teoria de Fonte-Filtro, já que esta se aproxima bastante de uma análise mecânica do sistema de produção de voz.

Tendo esta teoria por base, podemos afirmar que o sinal de fala é o resultado de fontes acústicas e da filtragem do sinal dessas fontes pelo aparelho fonador (laringe). As propriedades das ondas sonoras relacionam-se quer qualitativa quer quantitativamente com os mecanismos que as produzem.

Podemos portanto identificar duas fontes, a fonte harmónica ou glotal (laringe) e fontes de ruído, existentes ao longo do trato vocal. Podemos também identificar um filtro que não é mais que as cavidades de ressonância. Tendo isto assente, podemos imaginar a produção de voz como um circuito bastante simples, como se representa de seguida.

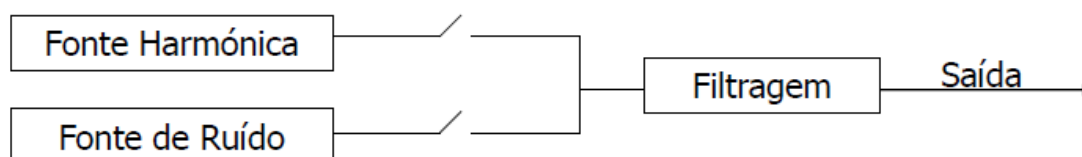


Figura 6 - Esquema da produção de voz à luz da Teoria de Fonte – Filtro

O sinal produzido na laringe tem, obviamente, uma frequência fundamental e harmónicos, produzidos por deslocamentos das pregas vocais. É ainda importante referir que as frequências naturais de vibração do trato vocal se designam por formantes e que quanto mais estreita for a abertura das cavidades glotais, maior será a redução da primeira formante.

Continuando a seguir esta teoria podem analisar-se alguns parâmetros vocais. A compreensão destes parâmetros facilitará a análise da qualidade da voz.

2.5 - Parâmetros vocais

Os parâmetros vocais mais avaliados são os mesmos usados para avaliar qualquer onda sonora, sendo eles a frequência, a amplitude e a qualidade. Por sua vez, estes parâmetros podem ser avaliados através de parâmetros objetivos e subjetivos; a tabela que se segue agrupa estes parâmetros para melhor se compreender a avaliação de cada um.

Parâmetros vocais	Parâmetros Objetivos	Parâmetros Subjetivos
Frequência	Frequência fundamental (F ₀)	Altura tonal (pitch)
Amplitude	Intensidade objetiva	Intensidade Subjetiva (Loudness)
Qualidade	Jitter Shimmer Índice sinal-ruído Índice harmónico-ruído	Rouquidão Aspereza Soprosidade Timbre

Tabela 2 - Parâmetros vocais e parâmetros usados para os avaliar

2.5.1 - Frequência

A frequência é uma grandeza física já muito estudada. É definida como o número de ocorrências de um dado evento num determinado intervalo de tempo, sendo medida em Hertz (Hz). Uma vez que estamos a falar da onda sonora provocada pela voz, estamos a medir o número de ciclos dessa onda, realizados num segundo.

No entanto, a voz não produz uma onda sinusoidal pura. Na verdade a voz é composta por uma frequência fundamental (F_0) e harmónicos. Assim torna-se mais objetivo avaliar a frequência da voz através da sua F_0 e não da sua frequência.

É sabido que o nível ótimo de voz produz uma frequência confortável para o orador, correspondendo a uma menor tensão laríngea. Existem de facto valores aproximados da F_0 que a voz do ser humano deve produzir em diferentes fases da sua vida, mostrados na tabela abaixo.

Sexo	Crianças	Feminino			Masculino		
Idade (anos)	8	20-29	40-49	80-89	20-29	40-49	80-89
F_0 média (Hz)	275,8	227	214	197	120	107	146

Tabela 3 - Valor da frequência fundamental média da voz no ser Humano

Por sua vez a altura tonal também é usada para medir a frequência mas de uma forma subjetiva. Esta mede a sensação que a frequência da voz transmite, tendo por base uma escala de agudo a grave. Apesar de bastante útil, especialmente aquando de funções de canto, este parâmetro não é o melhor para avaliar a voz de um indivíduo para o seu uso no dia-a-dia.

2.5.2 - Amplitude

A amplitude é também uma medida física muito conhecida. Esta representa o maior desvio da onda em relação ao zero convencionado. Tratando-se de uma onda sonora, aproximadamente sinusoidal, a amplitude indicará a distância do pico da onda ao zero.

A amplitude é avaliada através da intensidade objetiva, comumente chamada de volume. Esta representa o efeito sonoro proveniente da maior ou menor amplitude da onda, e é medida em Decibéis (dB). Este parâmetro permite facilmente perceber se um orador tem dificuldade em produzir sons de alto ou baixo volume.

Podemos ainda avaliar a amplitude usando a intensidade subjetiva, tendo por base uma escala de forte a fraco. Mais uma vez esta medida é muito usado para o canto.

2.5.3 - Qualidade

A qualidade da voz tenta avaliar a produção de voz quanto à sua clareza e tal como o nome indica quanto à qualidade do som produzido. Assim se uma voz possuir uma frequência e uma amplitude corretas, a voz terá uma boa qualidade.

Para avaliar a qualidade podem ser usados parâmetros objetivos que, na realidade, não são mais do que medidores de perturbações em outros parâmetros vocais. Por exemplo o Jitter mede uma perturbação da frequência, avaliando variações involuntárias de F_0 , enquanto o Shimmer avalia perturbações de intensidade.

No que toca à qualidade, os parâmetros subjetivos são ainda mais úteis uma vez que são mais fáceis de detetar. Por exemplo a rouquidão que é provocada por irregularidades vibratórias das pregas vocais é facilmente detetada pela presença de ruídos parasitas à emissão. O mesmo se passa quanto a aspereza provocada por rigidez da mucosa das pregas vocais perceptível através do som duro e pouco melodioso e quanto à soproidade provocada pela fenda glótica com escape de ar que se torna audível através de um ruído de fundo durante a emissão.

O timbre, sendo também uma medida subjetiva da qualidade, é algo mais complexa e de difícil perceção que os parâmetros anteriores, sendo a característica da voz relacionada com o filtro do sinal proveniente da laringe. Ou seja além de depender do sinal inicial depende ainda dos ressoadores (filtros) e da posição dos mesmos durante a fonação.

2.5.4 - Outros

Existem ainda outras formas de avaliar a voz como ataque vocal, registo vocal, extensão, tessitura e a classificação vocal. A maioria destes são parâmetros muito usados quando se avalia a capacidade de canto do indivíduo sendo que por isso não são muito relevantes a este estudo. A exceção é o ataque vocal que corresponde como a adução glótica se coordena com a respiração para iniciar a fonação.

Ao todo são três os tipos de ataques vocais, estes serão de seguida explicados uma vez que provocam deficiências na produção de voz: (1) ataque simultâneo – Consiste na libertação do fluxo expiratório no momento em que as pregas vocais se encontram na linha média; (2) ataque vocal aspirado – Fonação deficiente ou atrasada, levando a uma audível perda de ar antes da produção vocal; (3) ataque vocal brusco – Descoordenação completa entre as pregas vocais e a respiração.

3 O cérebro e a fala

É do conhecimento geral que nenhuma função do corpo humano se realiza sem o seu processamento a nível cerebral. A fala não é uma exceção, sendo que esta interação é já um tópico bastante estudado. Podemos dividir este processamento em seis partes: preparação da praxia verbal, preparação do movimento, desencadear do movimento, movimento orofacial, coordenação de movimentos e *audiofeedback*.

Estas partes do processamento envolvem diversas partes do cérebro e, obviamente, os indivíduos gagos também processam a sua fala através destes seis momentos. Cada vez mais se torna evidente que o cérebro de pessoas gagas tem um funcionamento diferente aquando da produção da fala.

Para que melhor se compreenda esta ideia, nas secções seguintes, serão apresentadas as diferenças que se encontram em cada uma das seis partes do processamento quando comparamos um indivíduo gago e um não gago. [2]

3.1 - Preparação da praxia verbal

Nesta primeira fase o discurso é pré-programado na área pré-motora inferior. Esta parte é muito importante no discurso normal pois permite que os movimentos necessários sejam coordenados. Em indivíduos não gagos dá-se uma ativação bilateral, com uma ligeira incidência no hemisfério esquerdo.

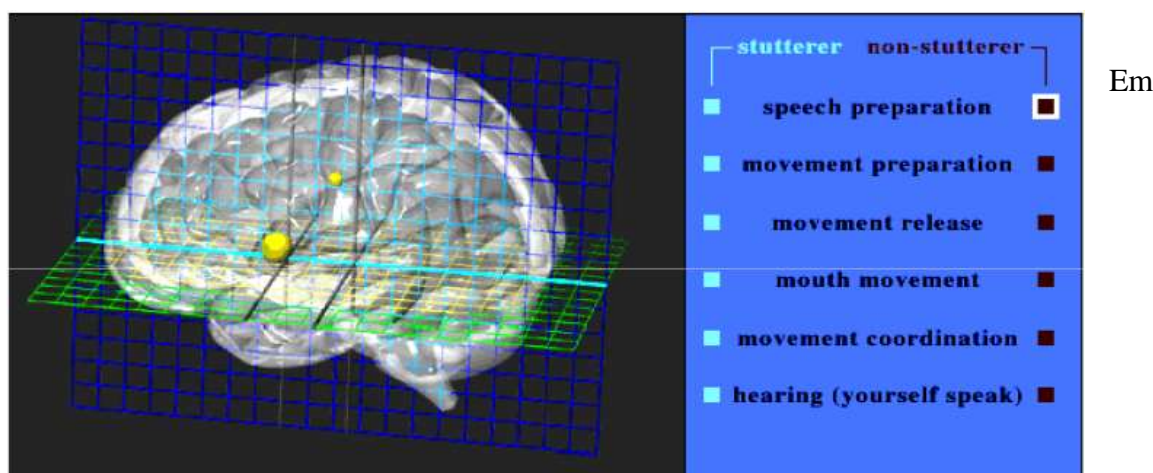


Figura 7 - Ilustração da preparação da praxia num indivíduo não gago

indivíduos gagos, durante esta preparação, o funcionamento cerebral é muito semelhante ao apresentado por não gagos.

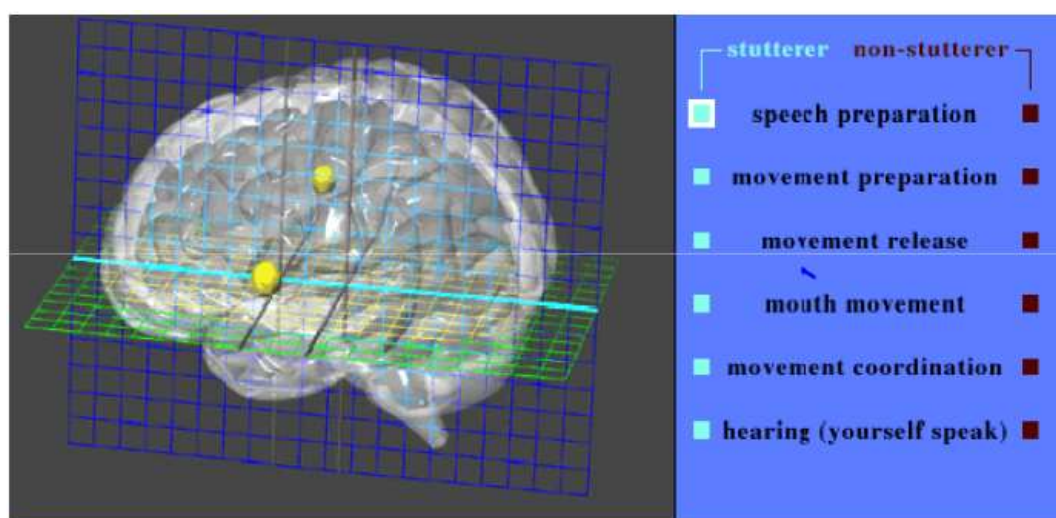


Figura 8 - Ilustração da preparação da praxia num indivíduo gago

3.2 - Preparação do movimento

A preparação dos movimentos do corpo é feita na área pré-motora superior, no entanto, apesar de a produção da fala necessitar de vários movimentos; num não gago esta área é minimamente ativada aquando da fala.

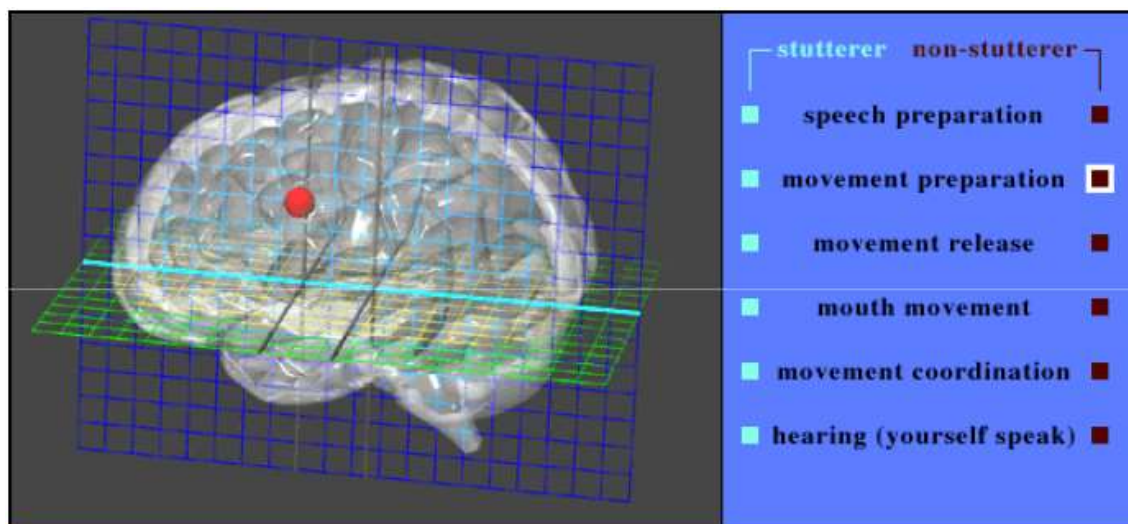


Figura 9 - Ilustração da preparação do movimento num indivíduo não gago

Aquando da produção de um discurso gaguejado há uma hiperatividade no córtex pré-motor superior. Mas se o orador passar para um período de fluência esta atividade excessiva cessa.

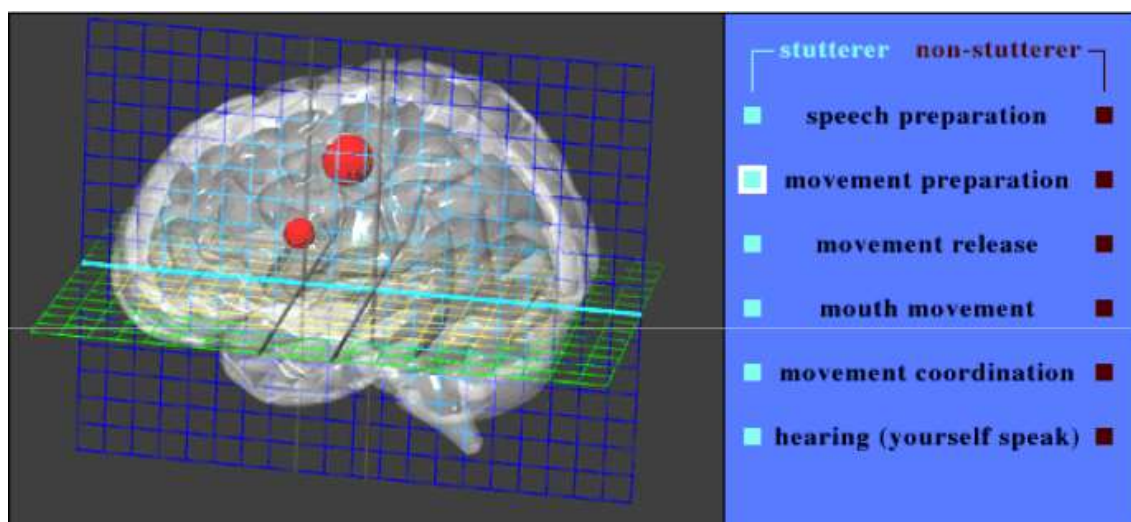


Figura 10 - Ilustração da preparação do movimento num indivíduo gago

3.3 - Desencadear do movimento

A realização dos movimentos depende da área motora suplementar, que descodifica os programas motores obtidos na preparação do movimento e os põe em prática. Esta função é muito importante para que o discurso e os movimentos envolvidos sejam feitos no momento exato. Mais uma vez, em indivíduos não gagos, esta área tem pouca atividade e dimensões reduzidas.

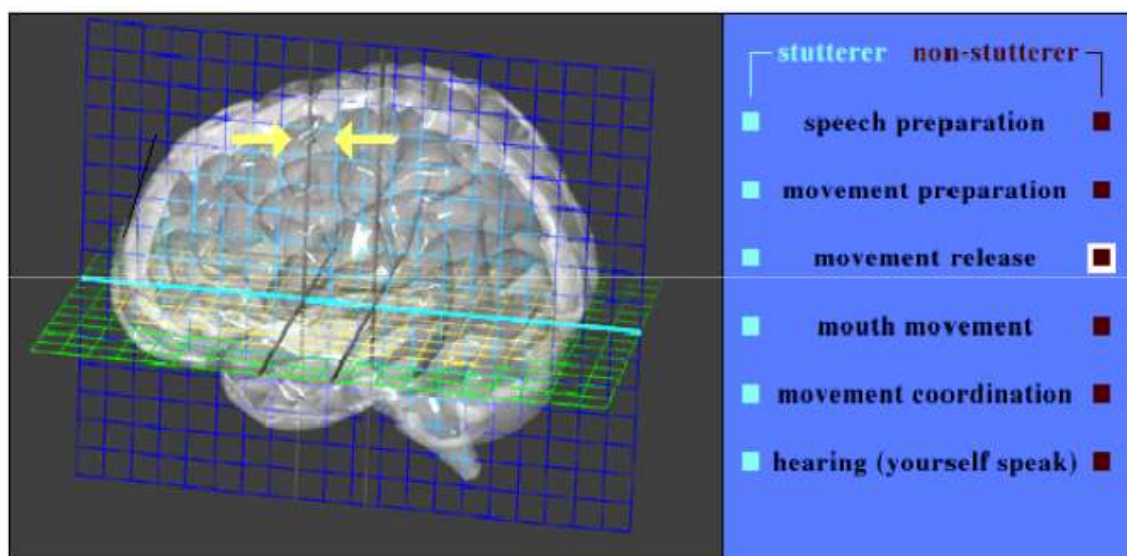


Figura 11 - Ilustração do desencadear do movimento em indivíduos não gagos

Por outro lado os indivíduos gagos apresentam uma hiperatividade nesta área aquando do discurso gaguejado. A gaguez resulta da interrupção dos programas motores que deviam estar a ser executados. Este fenómeno leva a que a área motora suplementar esteja a ser repetidamente reiniciada e “forçada”.

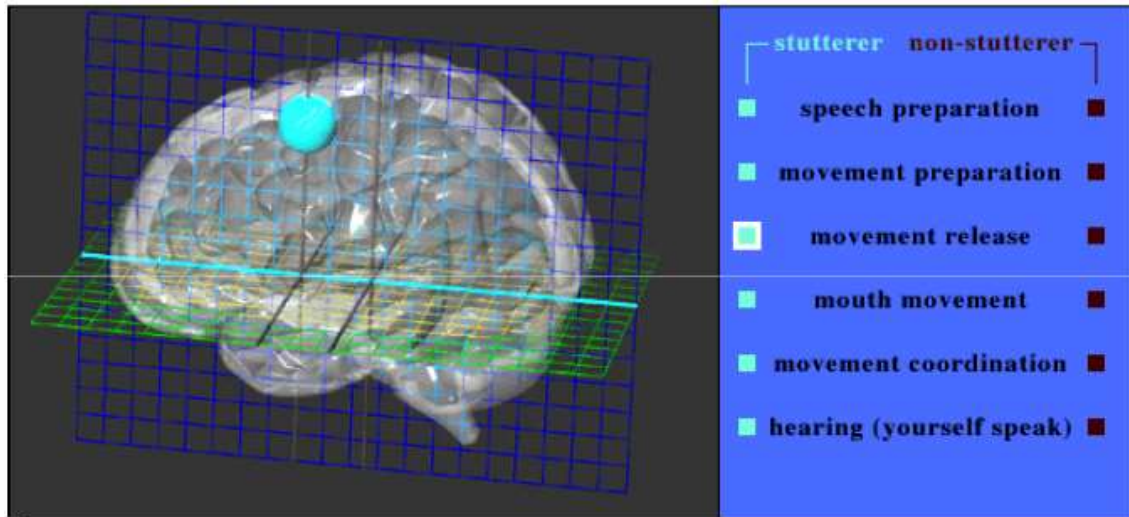


Figura 12 - Ilustração do desencadear do movimento em indivíduos gagos

3.4 - Movimento orofacial

Os movimentos orais são processados na área motora primária associada, como já foi visto, às áreas pré-motora inferior e motora suplementar. Em indivíduos não gagos a ativação desta área é mais evidente no hemisfério esquerdo.

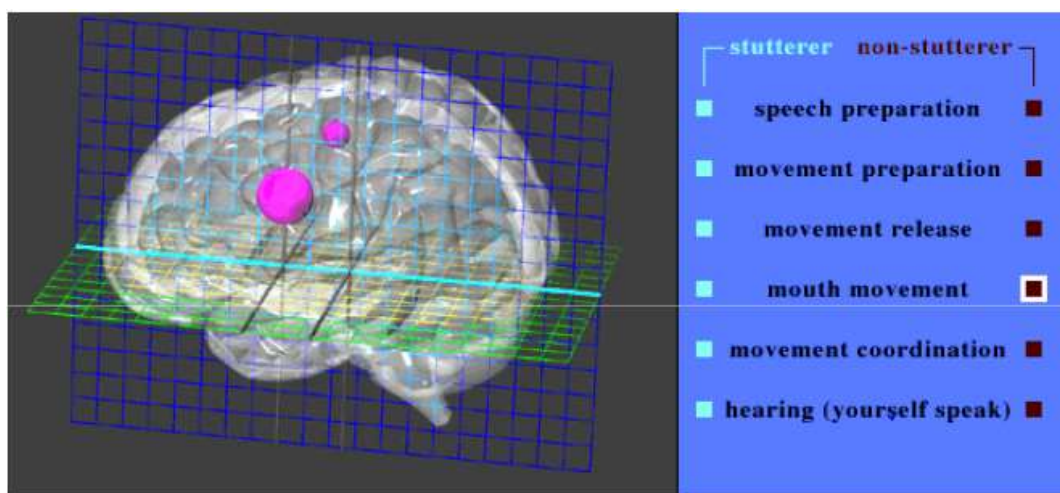


Figura 13 - Ilustração do movimento orofacial em não gagos

Por sua vez, em indivíduos gagos a ativação desta área do cérebro é feita bilateralmente. Isto sugere que em indivíduos gagos há alguma dificuldade no desenvolvimento da especialização do controle motor à esquerda.

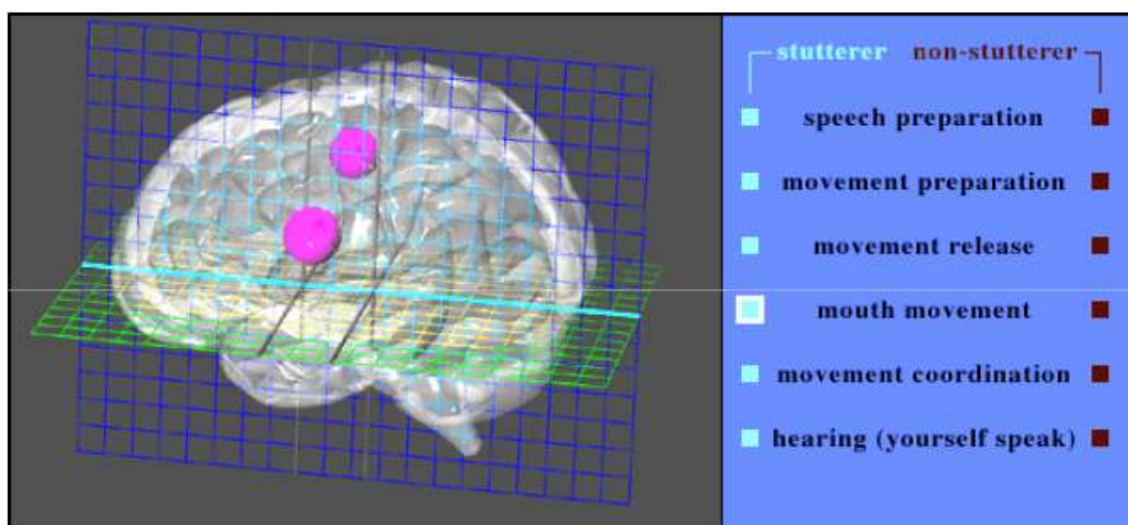


Figura 14 - Ilustração do movimento orofacial em gagos

3.5 - Coordenação de movimentos

É função do cerebelo usar informação obtida através dos sentidos (*feedback* sensorial) para manter suaves movimentos complexos. Aquando da fala este *feedback* incorpora os movimentos dos lábios, língua e maxilar e ainda a audição da própria voz. Durante a produção de fala em não gagos o cerebelo está minimamente ativo como se pode ver na imagem abaixo.

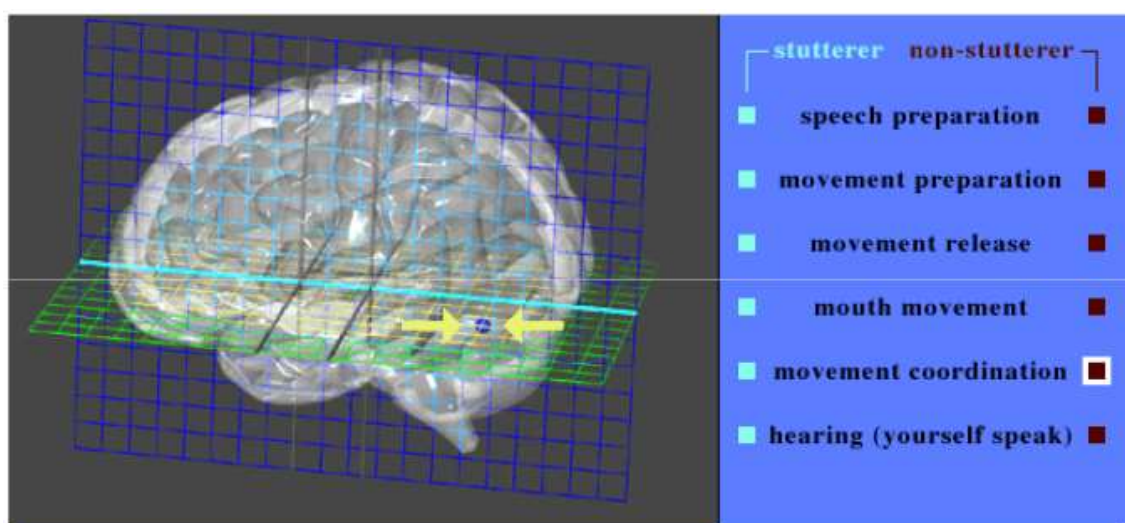


Figura 15 - Ilustração da coordenação de movimentos em não gagos

Em indivíduos gagos há uma grande ativação do cerebelo, especialmente aquando de discurso gaguejado. Por sua vez acredita-se que esta ativação excessiva mostra que o *timing* cerebral e a coordenação dos programas motores estão muito afetados em gagos.

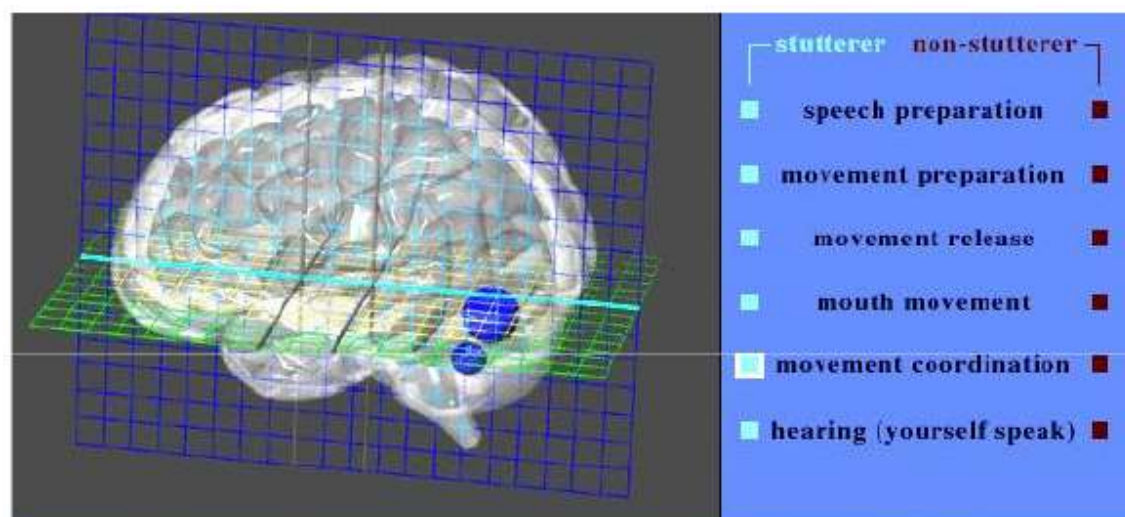


Figura 16 - Ilustração da coordenação de movimentos em gagos

3.6 - Audiofeedback

É já do conhecimento geral que os sons, mesmo os provenientes da própria voz, são analisados e decodificados na área temporal superior. A ativação desta área aquando da produção de fala mostra que a auto audição faz parte do discurso normal e fluente. Em não gagos a ativação desta área encontra-se lateralizada no hemisfério esquerdo.

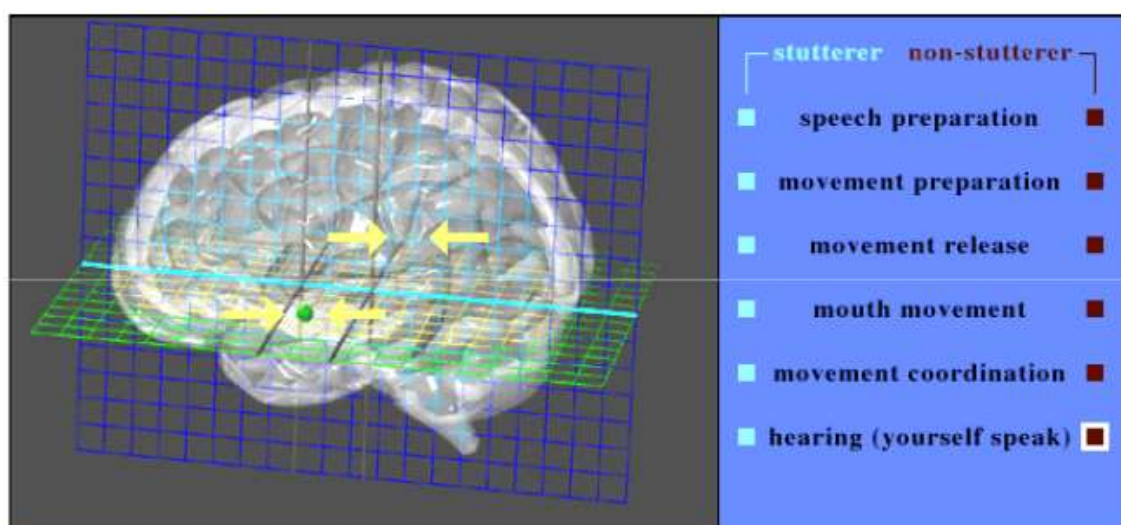


Figura 17 - Ilustração do audiofeedback em não gagos

Durante o discurso gaguejado a área temporal superior quase não se encontra ativa. Isto mostra que indivíduos gagos quase não usam esta função, não se sabe no entanto se esta falta de uso é uma causa da gaguez ou uma compensação para a mesma.

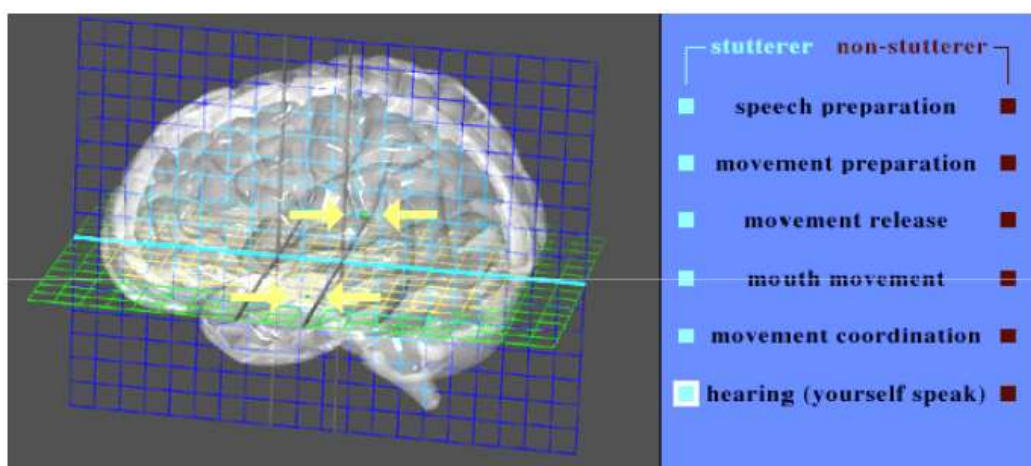


Figura 18 - Ilustração do audiofeedback em gagos

4 Patologias do trato vocal

Uma vez que a voz é de uma importância elevada para o ser humano, tem-se dado uma atenção especial a patologias que possam afetar o correto funcionamento da mesma. São imensas as doenças que podiam ser aqui referidas. No entanto serão focadas apenas as mais comuns.

É através da vibração das cordas vocais que conseguimos a nossa voz e é portanto fácil perceber que qualquer doença que afete estes órgãos vai, por sua vez, provocar alterações na voz. Estas alterações, sendo produzidas por patologias do trato vocal, têm o nome de disfonias.

4.1 - Principais causas de disfonias

Uma das principais causas de problemas de voz é o aparecimento de nódulos nas cordas vocais. Estes são muito comuns em crianças e jovens adultos e ocorrem, normalmente, por um uso impróprio da voz ou por um uso excessivo. O trauma cíclico entre as cordas vocais origina locais de endurecimentos que depois impedem a correta vibração das mesmas originando assim uma disfonia.[3]

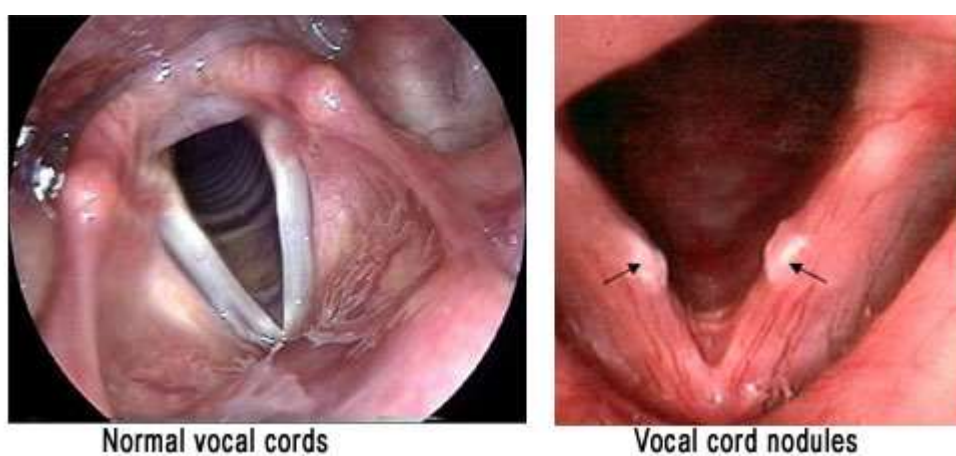


Figura 19 - Imagem de nódulos das cordas vocais

Outro exemplo de uma patologia cuja origem reside no incorreto uso da voz é o edema de Reinke, o edema das cordas vocais, muito comum em indivíduos que fumam e usam muito a voz. Se não forem corretamente tratados podem provocar danos irreversíveis na qualidade da VOZ.

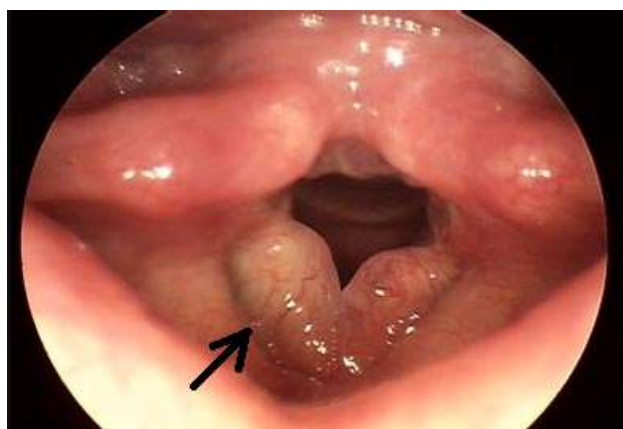


Figura 20 - Cordas vocais inchadas devido a um edema de Reinke

No entanto, a origem de disfonias nem sempre residem no mau uso ou mau tratamento da voz. Na realidade, muitas pessoas nascem já com algumas alterações estruturais mínimas que podem ou não levar a alterações na voz. As mais comuns são sulcos, pontes mucosas, cistos e diafragma laríngeo. Pode acontecer que o mesmo indivíduo possua mais do que uma destas alterações estruturais, sendo um problema em qualquer idade.

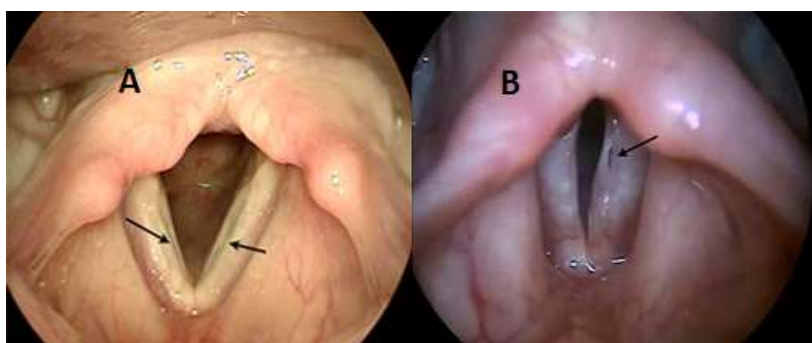


Figura 21 - A- cordas vocais com sulcos; B- Cordas vocais com pontes mucosas

Outra das razões mais comuns para a disfonia é o aparecimento de pólipos ou tumores. Qualquer uma destas patologias é independente da idade, sendo que os tumores são mais comuns em fumadores e em homens com mais de quarenta anos de idade. Ambos se caracterizam pelo aparecimento de uma estrutura anormal nas cordas vocais, estrutura essa que é benigna no caso dos pólipos e maligna no caso dos tumores.

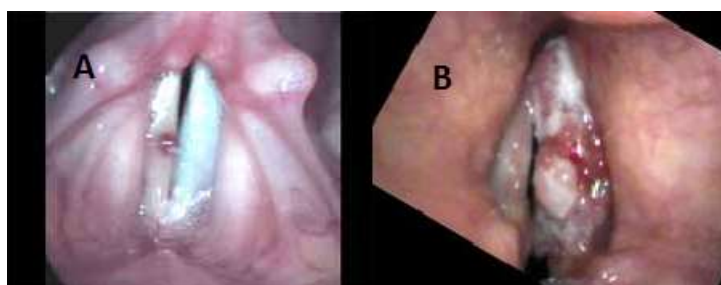


Figura 22 - A- Cordas vocais com um pólipo; B- Cordas vocais com um tumor

4.2 - Patologias e a Gaguez

Após o estudo de disfonias surge a possibilidade de algumas patologias levarem à gaguez. Na verdade existem algumas doenças que podem levar à gaguez. No entanto, ao contrário das disfonias estudadas até agora, onde o problema residia nas cordas vocais, a gaguez é essencialmente provocada por problemas a nível cerebral.

Podemos dividir estes problemas em dois grandes grupos: (1) anomalias no controlo motor da fala e (2) lesões cerebrais.

No primeiro grupo inserem-se os indivíduos que, devido à genética, apresentam falhas no controlo cerebral da voz.

Quanto às lesões cerebrais, estas incluem acidentes vasculares cerebrais (AVC), paragem cardíaca com anóxia cerebral entre outros que possam levar a que o controlo da produção da fala falhe. [4]

5 Gaguez

A perturbação de fluência, comumente chamada de gaguez, é definida pela Associação Portuguesa de Gagos (APG) como uma perturbação da comunicação em que a pessoa sabe exatamente o que quer dizer mas o seu discurso é caracterizado por repetições, prolongamentos, pausas não esperadas e por bloqueios em que o som de fala é interrompido. Pode ainda observar-se, associado aos anteriores, movimentos faciais ou do corpo enquanto a pessoa fala. [5]

Nos tópicos que se seguem, esta definição será melhor compreendida, uma vez que serão referidas mais detalhadamente causas, sintomas e tratamentos da gaguez.

5.1 - Causas da gaguez

A gaguez pode ser provocada por uma combinação de vários fatores, sendo que ainda hoje vários peritos no tema têm opiniões diferentes quanto às suas possíveis causas. No entanto sabe-se que cerca de 60% das pacientes com esta disfluência herdou-a no seu código genético. Estudos de imagiologia funcional cerebral por Ressonância Magnética mostraram que os indivíduos gagos usam áreas distintas e de forma diferente aquando da produção da fala. Isto mostra que causas neurológicas podem estar por detrás da gaguez.

Causas psicossociais são também bastante comuns, podendo destacar-se exigências do meio envolvente e a forma como as pessoas mais próximas (família) lidou com os primeiros sinais de gaguez.

Problemas físicos de falta de coordenação muscular também podem levar à gaguez. Isto porque a fala implica a coordenação dos músculos respiratórios, dos músculos que controlam a emissão da voz e os músculos da língua, lábios e mandíbula. A falta de coordenação entre qualquer um destes músculos predispõe o indivíduo para a gaguez. No entanto estas são as causas de gaguez mais fáceis de solucionar, uma vez que melhorar a vocalização, o controlo da respiração e o controlo dos movimentos da língua e lábios melhora em muito a produção da fala destes indivíduos.

Os estudos recentes têm permitido desmistificar algumas causas da gaguez, como por exemplo a gaguez não é provocada por questões psicológicas como traumas [5] e não foi encontrada qualquer relação entre a gaguez e a destriedade do indivíduo. [2]

Sabe-se ainda que normalmente a gaguez tem, por norma um aparecimento gradual, sendo que em poucos casos pode ter um começo abrupto. [6]

5.2 - Tipos de gaguez

Existem três tipos de gaguez que se podem apresentar isolados ou combinados entre eles: as repetições, bloqueios e os prolongamentos.

A forma de gaguez por repetições é a mais comum, caracterizando-se por uma repetição frequente e persistente de sons, sílabas ou palavras. No entanto só o simples facto de efetuar estas repetições não chega para considerar um indivíduo gago. O elo de separação entre as repetições normais e as repetições de um indivíduo com gaguez é a frequência com que tal acontece. Se as repetições forem feitas três vezes seguidas ou então mais de três vezes por minuto durante a fala espontânea, é sinal de um estado de gaguez.

Os bloqueios são bastante mais fáceis de se observar, uma vez que são caracterizados por uma dificuldade em produzir um som ou palavras (por exemplo “pai” e a letra “p” parece não sair), acompanhada de sinais de esforço nos lábios e olhos, respirações mais profundas e até em gesticulações excessivas. Por norma este tipo de gaguez é muito fácil de observar em crianças. Os bloqueios são bastante stressantes, sendo que na maioria dos casos interrompem o discurso. Este tipo de gaguez apresenta-se com maior frequência em palavras que começam com as consoantes “b”, “c”, “d”, “g”, “m”, “n”, “p” e “t”.

A gaguez por prolongamentos refere-se à duração excessiva de um som. Se um som se prolonga por dois segundos ou mais é considerado uma forma de gaguez. Prolongar a duração do som da letra “s” é um dos tipos mais comuns.

Além destes tipos, há ainda alguns sinais de alerta a ter em conta como tremores, esforço, tensão e momentos de medo aquando da fala [7] e aumento da intensidade e frequência do som.

5.3 - Estados de desenvolvimento da gaguez

Como referido anteriormente, a gaguez inicia-se de forma gradual, podendo ser dividida em diferentes estados, num total de cinco. Importa referir que um indivíduo que se encontra num estado não tem necessariamente de passar ao próximo, podendo evitar essa passagem. No entanto um indivíduo com gaguez adulto passou pelos cinco estados referidos.

5.3.1 - Estado 1 – Disfluência normal

Decorre entre os dois e os seis anos de idade. O domínio da língua e da fala é ainda suscetível a falhas visto que ainda é uma idade de aprendizagem. Nesta fase pausas para planear o discurso e algumas repetições e interjeições são ainda normais. No entanto estas não devem exceder as dez disfluências em cem palavras.

Durante esta etapa o orador não apresenta tensão visível, frustração ou ansiedade quando fala disfluentemente.

5.3.2 - Estado 2 – Fronteira com a gaguez

Tal como o primeiro estado, este decorre entre os dois e os seis anos de idade. Neste as disfluências passam essencialmente por repetições e prolongamentos, sendo que o indivíduo produz mais de sete disfluências a cada cem palavras, com períodos de fluência e disfluência a decorrer de forma cíclica. Pela sua jovem idade, o orador apresenta pouca preocupação para com a disfluência mas pode sentir frustração por a sua mensagem não ser facilmente produzida nem entendida.

5.3.3 - Estado 3 – Começo da gaguez

Ainda entre os dois e os seis anos de idade, há um aumento do número de disfluências e da frequência com que estas ocorrem. A gaguez apresenta-se em ciclos que, se forem muito frequentes, levam a que o orador tome consciência das suas dificuldades em falar o que irá aumentar a sua frustração e medo em relação a momentos de comunicação.

5.3.4 - Estado 4 – Gaguez intermédia

Ocorre entre os seis e os treze anos. Aqui os três tipos de gaguez - repetições, prolongamentos e bloqueios já são bem evidentes. A gaguez deixa de ocorrer por ciclos e torna-se crónica, sem períodos de fluência.

Durante este período podem desenvolver-se comportamentos secundários, que ocorrem simultaneamente às disfluências, como piscar os olhos e movimentos excessivos dos membros e dos lábios. Desenvolve-se medo e evita-se alguns sons, palavras e até pessoas por forma a evitar o diálogo. Embaraço e vergonha são muito comuns e são “sintomas” do auto-conceito de gago.

5.3.5 - Estado 5 – Gaguez avançada

Ocorre desde os catorze anos e prolonga-se indefinidamente. Neste estado o indivíduo já se identifica como um gago e sente frustração e vergonha por isso. O indivíduo consegue identificar situações de gaguez e evita-as sempre que consegue.

É comum que durante episódios de gaguez apresente muito pouco contacto ocular e use vários “truques” para prosseguir com a sua fala, ou mesmo que evite comunicar, já que a gaguez é vista como um *handicap*. [7]

5.4 - Auto-conceito de gago

Como referido, a gaguez leva a experiências ansiógenas, que condicionam a personalidade e relações pessoais sejam afetadas de formas negativas.

Os gagos indivíduos assumem alguns estereótipos como a gaguez ser um comportamento socialmente inaceitável e que a sua gaguez trará apenas reações negativas e de desaprovação, o que leva a que os gagos optem muitas vezes evitar assim situações de discurso e a serem incapazes de expressar alguns sentimentos, como raiva. Por sua vez estas opções levam a um sentimento de culpa acrescido e a uma sensação de falta de controlo que podem culminar em depressão.

5.5 - Problemas na análise de um indivíduo gago

A gaguez é difícil de diagnosticar corretamente, bem como o planeamento de um tratamento eficaz. Isto porque a gaguez apresenta variadas inconsistências. Muito dificilmente se encontra dois indivíduos cuja gaguez se manifeste da mesma forma.

Por exemplo alguns pacientes falam fluentemente apenas quando estão com pessoas de confiança, gaguejando quando estão na presença de estranhos, enquanto outros apenas gaguejam diante de pessoas de confiança. O mesmo se passa com indivíduos que gaguejam quando estão irritados e outros que o fazem apenas quando se encontram calmos.

Há ainda casos de crianças que gaguejam na fala comum mas não o fazem a cantar. É também normal encontrar pacientes que gaguejam num idioma mas não o fazem noutro. Isto mostra que a gaguez está ligada a processos de controlo de estímulos, sejam eles de condicionamento, generalização e discriminação de estímulos tanto sociais, intraverbais e de estados emocionais.

5.6 - Tratamento da gaguez

Como qualquer outro problema de saúde a gaguez é tratada com maior facilidade e eficácia se o for numa idade precoce e no momento em que aparece. Quanto mais velha for a pessoa e quanto mais antiga a gaguez, mais difícil será o seu tratamento, necessitando de mais tempo, técnicas e esforço para a solucionar, sendo que será muito mais difícil eliminá-la por completo.

O tratamento passa por exercícios de fala, planeados e executados por terapeutas da fala. Estes exercícios passam essencialmente por dar a entender ao indivíduo o seu problema e realizar exercícios de respiração e de produção de sons específicos. Para isto usam-se técnicas como repetição lenta de palavras, listas de palavras foneticamente semelhantes, prolongamentos de vocais entre outras.

6 Avaliação do trato vocal

O trato vocal foi já analisado quer através da sua anatomia, quer através da qualidade da voz que produz. No entanto, foi apenas explicado como se avalia a qualidade da voz. Pelo que já sabemos esta avaliação é insuficiente uma vez que problemas anatómicos podem explicar falhas na produção da voz.

Ao contrário da avaliação à voz, uma análise anatómica é sempre objetiva uma vez que é sabido como as estruturas físicas devem ser e se devem comportar.

Existem inúmeros exames médicos para estudar as diversas estruturas do trato vocal, contudo o funcionamento das mesmas não é de relevância maior para este estudo. Assim sendo, serão abordados os princípios básicos das técnicas de imagem por Tomografia Computorizada (TC) e Ressonância Magnética (RM), pois é nestes exames que se basearão as análises feitas posteriormente.

6.1 - Tomografia computadorizada

A TC é uma técnica de imagem médica cuja finalidade é obter a imagem de uma secção do corpo.



Figura 23 - Máquina tipo onde se realizam TAC

Para que esta imagem seja obtida, submete-se o paciente a radiação X e posteriormente a informação produzida através da passagem da radiação que atravessou o paciente e chegou aos detetores do equipamento é processada para gerar informação digital em tonalidades de cinzento [8;9]. Este é o procedimento padrão do exame para qualquer outra parte do corpo humano. Estruturas mais compactas e de número atómico mais elevado, por exemplo as estruturas ósseas, terão uma densidade na imagem superior às estruturas de partes moles - língua - ou às vias aéreas - orofaringe, laringe, etc.



Figura 24 - Exemplo da imagem obtida através de uma TC ao pescoço

6.2 - Ressonância magnética

Tal como a TC a RM é um exame médico de diagnóstico que não usa nenhuma radiação ionizante pelo que é aparentemente inócuo ao ser humano. Por sua vez, a tecnologia aqui usada é muito mais complexa, envolvendo ondas de radiofrequência e um campo magnético bastante forte. [10]

Este exame permite obter imagens bastante detalhadas em vários planos (axial, coronal e sagital). [11]

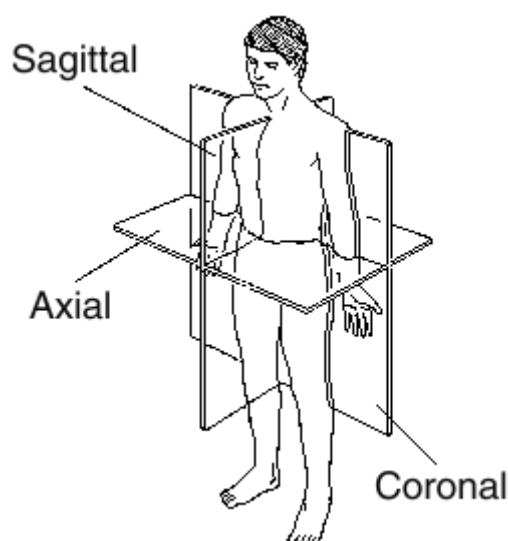


Figura 25 - Ilustração dos planos Sagital, Coronal e Axial

As imagens obtidas através desta técnica têm igualmente uma espessura e espaçamentos muito reduzidos. As aquisições podem até ser infra milimétricas e sem espaçamento, permite depois criar igualmente dados em #D com relativa facilidade, tal como as imagens da TC.

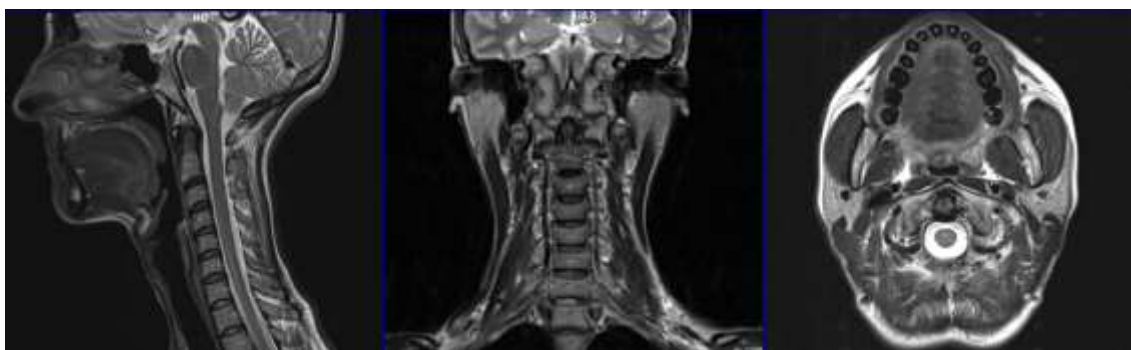


Figura 26 - Exemplo das imagens obtidas, nos três planos ortogonais (sagital, coronal e axial) de um exame de RM

7 - Estudo biomecânico

Depois de reunidos os conhecimentos fundamentais à percepção do funcionamento da gaguez e das interações anatómicas que influenciam o seu desenvolvimento, é possível dar início ao estudo biomecânico da mesma.

Antes de iniciar a segmentação e modelação a três dimensões, será feita uma apresentação dos trabalhos já efetuados neste campo.

7.1 - Estado da arte

Pela complexidade da produção da voz e, por sua vez a complexidade da gaguez, torna-se intuitivo que este problema será complicado de simular através de um sistema biomecânico computacional.

No entanto estudos e simulações computacionais de componentes da gaguez foram já efetuado, sendo que muitos deles utilizavam imagens de TC, RM e Raios-X o que os aproxima do trabalho aqui a ser realizado. De facto existem estudos sobre a análise do som produzido por gagos quando comparados com pessoas fluentes [12], há ainda alguns trabalhos sobre a análise dos movimentos efetuados pelos músculos faciais aquando de episódios de gaguez. [13] Além destes, existem, como foi já referido, trabalhos com o intuito de analisar o funcionamento cerebral de indivíduos gagos em comparação com não gagos [2].

Existem ainda alguns estudos que visam modelar as estruturas responsáveis pela produção da fala. Estes estudos diferem do presente trabalho uma vez que a modelação usada foi sempre a duas dimensões ou através de modelos numéricos. [14,15,16,17] A única estrutura que já mereceu modelações a três dimensões foi a língua [15,18], sendo que estes modelos foram apenas usados para avaliar movimentos criados aquando da produção de fala fluente.

Como tópico de curiosidade, e para demonstrar que a produção da fala cativa bastante os investigadores, é possível referir que já foram criadas bases de dados de imagens de RM, para indivíduos de ambos os sexos, que permitem observar os movimentos efetuados ao ler inúmeras palavras em Inglês. [19]

Obviamente estes estudos levaram a conclusões importantes nos suas diferentes áreas de aplicação mas, é importante realçar que na sua maioria os autores referem que o estudo computacional da produção da fala, seja em indivíduos com ou sem gaguez, é útil e tornar-se-á uma ferramenta imprescindível no futuro.

Uma vez referidos estes estudos é viável dizer que, quanto sabemos, a abordagem de simulação que irá ser preconizada no presente trabalho não foi ainda efetuada.

7.2 - Software MIMICS

A segmentação e modelação a três dimensões será efetuada usando o software Mimics v.16 (Software and Services for Biomedical Engineering, Materialise HQ, Belgium), criado para o processamento de imagens médicas, como as obtidas por TC e RM. [20]

Este programa permite segmentar estruturas com base na sua densidade/intensidade de sinal, e depois criar um modelo 3D com elevada acuidade.

Este procedimento pode ser melhor entendido se forem observadas imagens adquiridas no contexto do presente trabalho, que mostram a identificação de estruturas de interesse de densidade elevada (vértebras cervicais, cartilagem), que serão posteriormente incluídas ou excluídas para criar um sólido de cada uma das estruturas, no caso específico o osso hióide.

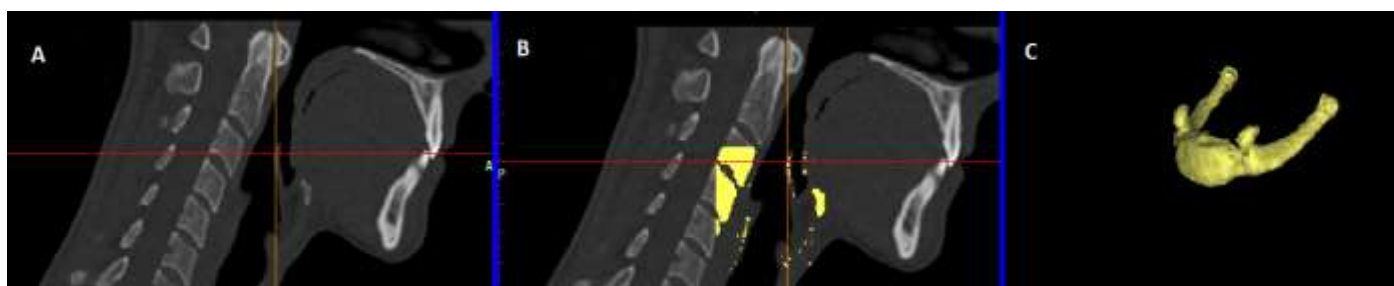


Figura 27 - A - Imagem inicial, B- Segmentação, C- Modelo 3D do osso hióide

No exemplo escolhido apenas foi mostrada a segmentação automática com base em *threshold* de densidade do pixel no plano sagital. No entanto, este processo pode ser feito para qualquer plano para tornar possível criar o modelo. Além disso, a segmentação mostrada na figura 27 – B é, como já foi referido, o resultado de um processo automático, sendo posteriormente refinada através de filtros, operações booleanas e exclusão manual de pixéis para resultar na morfologia final do modelo.

Este exemplo será explicado detalhadamente na seção seguinte.

7.2.1 – Utilização do MIMICS

Segmentar qualquer estrutura utilizando o Mimics® requer o seu conhecimento anatômico, o que implica identificá-la inicialmente nas imagens médicas. No presente caso do osso hióide, este foi claramente identificado usando as imagens da figura que se segue.

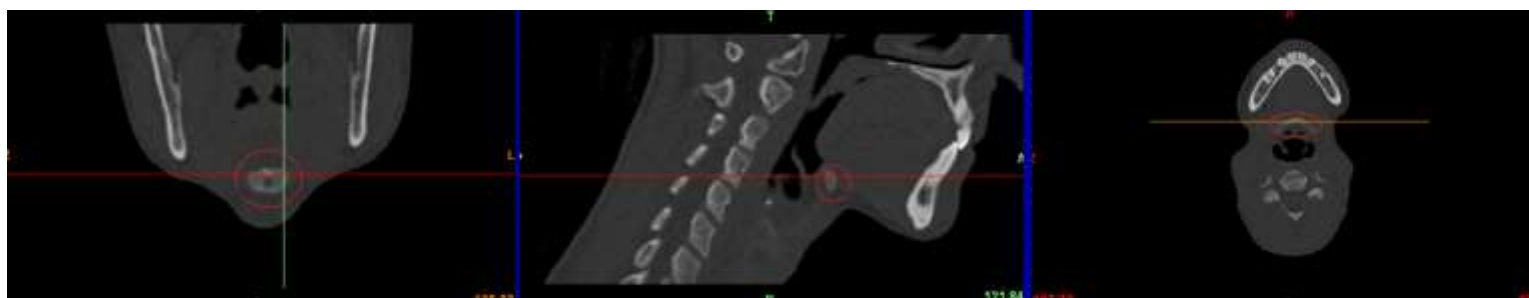


Figura 28 - Identificação do Osso Hióide nas imagens médicas

Como se pode observar estas imagens ainda não foram sujeitas a qualquer procedimento de segmentação, apenas foi observada a estrutura a modelar. O passo seguinte será a criação de uma máscara através do uso de um *threshold* de densidade do pixel que permita seleccionar a estrutura em questão.

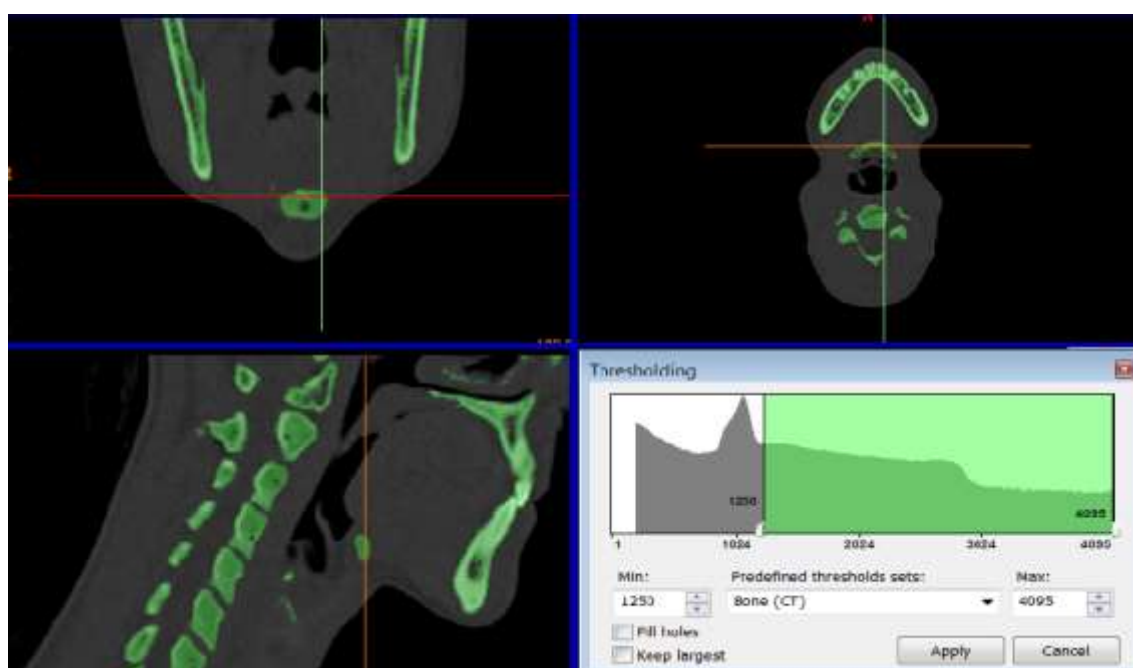


Figura 29 - Criação de uma máscara que inclua o osso hióide usando threshold

É importante que a máscara criada inclua toda a estrutura. De notar que pelo tamanho reduzido do osso hióide, quando comparado com toda a imagem, a criação da máscara poderia ter sido feita apenas na área circundante, criando uma máscara semelhante à que pode ser observada na figura 27 – B.

Uma rápida observação da figura 29 permite observar que a máscara criada não só contém o osso hióide, como muitas outras estruturas que de momento não têm qualquer interesse. Para refinar esta máscara é usada a ferramenta *Region Growing*. Esta função do programa requer que seja escolhido um ou mais pixéis da máscara atual, neste caso pixéis do osso hióide. Posteriormente e de forma automática, ela seleciona apenas os pixéis que estiverem em contacto com os selecionados e que pertençam à máscara atual.

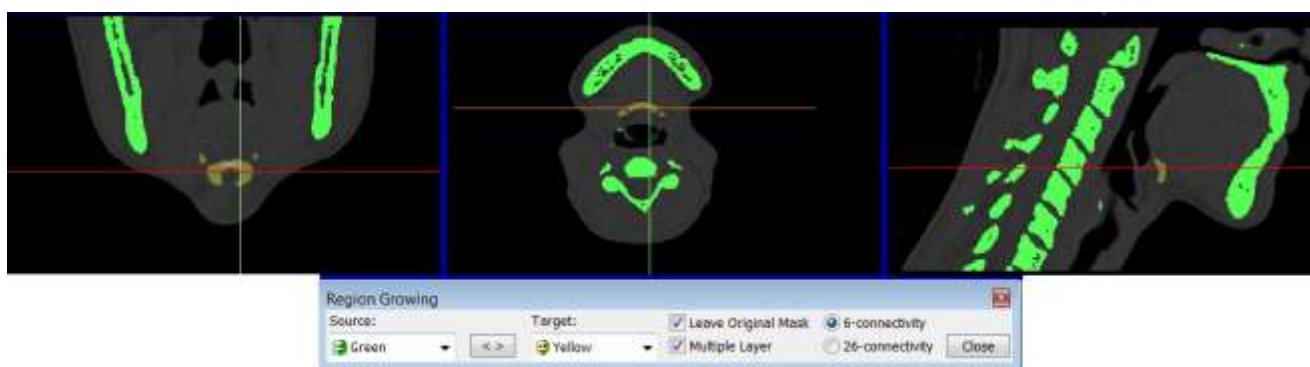


Figura 30 - Criação de uma nova máscara apenas com o Osso Hióide usando Region Growing

A nova máscara, representada a amarelo na figura 30, deve representar por completo o osso hióide. No entanto, devido à alguma falta de precisão nas imagens ou no processo automático do programa por vezes há falhas, pelo que uma verificação manual é necessária. Neste exemplo há duas pequenas áreas entre o corpo do osso hióide e os grandes cornos como se pode ver na figura 31.

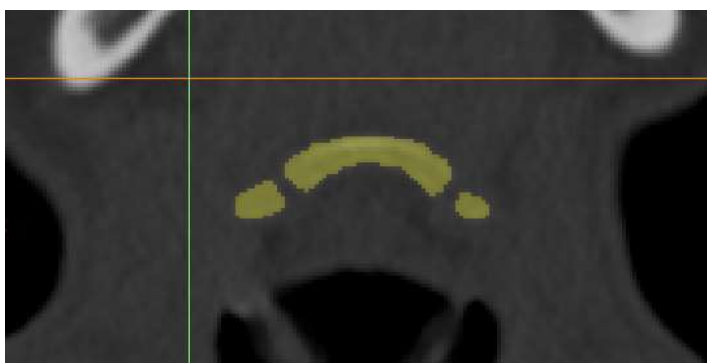


Figura 31 - Imagem que mostra falhas na máscara criada de modo automático

Estas falhas são solucionadas de forma manual, seleccionando os pixéis que faltam para obter a totalidade da estrutura em questão.

Quando se obtém uma máscara com a estrutura completamente seleccionada sem qualquer erro é possível criar o seu modelo 3D, de forma automática pelo programa e representa a estrutura real do indivíduo em estudo. O modelo do osso hióide criado nesta explicação pode ser observado na figura 32.



Figura 32 - Modelo sólido do Osso Hióide criado através do Software MIMICS

7.3 - Software 3-MaticSTL

O software 3-MaticSTL v9.0 (Software and Services for Biomedical Engineering, Materialise HQ, Belgium) é a ponte de ligação entre o modelo obtido utilizando o MIMICS e a análise de elementos finitos. Este permite reestruturar a malha e corrigir falhas na superfície do modelo de forma a tornar viável o seu estudo futuro. [21]

O número de ferramentas que este software disponibiliza é muito elevado sendo que muitas delas não apresentam interesse no estudo em questão. Assim sendo, e a título de exemplo, podemos observar na imagem abaixo a o uso da ferramenta mais utilizada no decorrer deste trabalho.

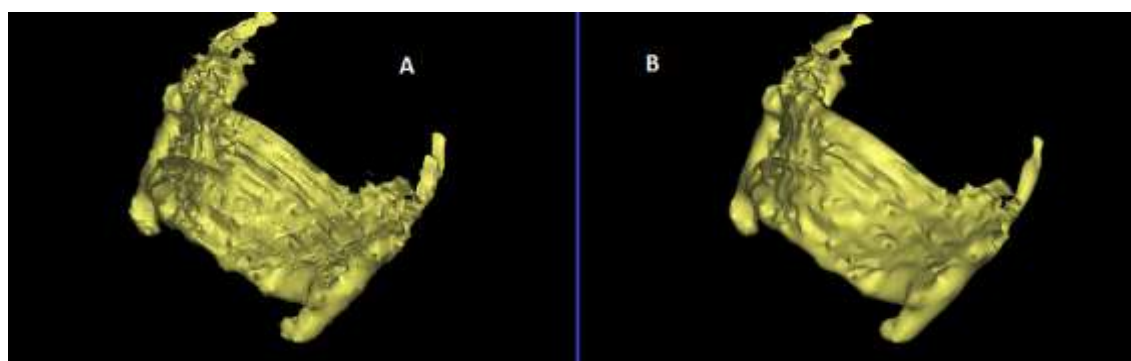


Figura 33 - A) Modelo da cartilagem tiroideia obtido usando o MIMICS; B) o mesmo modelo após a utilização do 3-MaticSTL

A ferramenta em questão é a opção de suavizar a superfície. O seu uso permite eliminar impurezas do modelo causadas pela seleção de pixéis “parasitas” que apenas iriam levar a resultados incorretos aquando da análise por elementos finitos.

7.4 - Imagens usadas

Todas as imagens de TC e RM usadas neste trabalho são provenientes de exames médicos a um voluntário do género feminino, de 38 anos, gago, que não efetuou terapia da fala.

O protocolo de exame incluiu imagens de TC adquiridas num equipamento SOMATOM Sensation cardiac 64 (Siemens Medical Solutions, Erlangen, Germany), que possui um array de 64 detetores. Foram obtidas imagens anatómicas em repouso e a realizar os sons das letras “a” e “p”, com os seguintes parâmetros: 120kVp; corrente do tubo de 35 mAs; 16.67 segundos de exposição; matrix = 512x512 pixéis. As imagens foram adquiridas com espessura de 0.6mm, reformatadas posteriormente com 2mm de espessura, em algoritmo de tecidos moles e osso. Foram adicionalmente efetuadas reconstruções multiplanares nos planos coronal e sagital.

As imagens de RM foram adquiridas num equipamento de intensidade de campo 3T (MAGNETOM® Tim Trio, Siemens Medical Solutions, Erlangen, Germany), equipado com uma antena com 16 canais para o estudo do pescoço. Foram adquiridas imagens estruturais, em repouso, nos 3 planos ortogonais, ponderadas em T2 (FSE), com os seguintes parâmetros: plano sagital (30 imagens, espessura de 3mm, com espaçamento de 0.3mm; tempo de eco / tempo de repetição (TE/TR) = 88/4700ms; field-of-view (FOV) 240x240mm; matriz 320x320 pixéis; tempo de aquisição 4:19min), plano coronal (33 imagens, espessura de 3mm, com espaçamento de 0.3mm; TE/TR = 88/5130ms; FOV 240x240mm; matriz 320x320 pixéis; tempo de aquisição 4:43min); plano axial (45 imagens, espessura de 3mm, com espaçamento de 0.3mm; TE/TR = 93/3800ms; FOV 240x240mm; matriz 320x320 pixéis; tempo de aquisição 5:28min).

É importante referir que todas as imagens foram analisadas com o objetivo de procurar quaisquer problemas anatómicos ou lesões que inviabilizassem o seu uso. No entanto as imagens da voluntária não apresentam quaisquer alterações.

7.4.1 – Uso de RM e TC

Torna-se importante explicar o porquê da necessidade de usar imagens provenientes de TC e RM em vez de usar apenas imagens de RM.

É reconhecido que as imagens de RM possuem mais detalhe anatômico, mas particularmente maior contraste entre os tecidos, o que torna mais fácil visualizar as diferentes estruturas. No entanto, estas são bastante mais difíceis de segmentar, enquanto que as imagens provenientes de TC possuem maior contraste entre estruturas das vias aéreas, osso e estruturas cartilagíneas.

Tendo isto em consideração, a segmentação foi dividida entre as diferentes imagens das duas técnicas, uma vez que ambas são provenientes do mesmo paciente isto não constitui um problema para a construção do modelo.

As imagens de TC foram usadas para segmentar o osso hióide, a cartilagem tiroideia, a cartilagem cricoideia a epiglote e a língua. Enquanto que a partir das imagens de RM foram segmentadas a nasofaringe, a orofaringe e o início da traqueia.

7.5 - Verificação dos modelos obtidos

Tal como foi referido anteriormente no decorrer deste trabalho foram criados três modelos anatómicos, um onde o sujeito estava em repouso, um com o sujeito produzir o fonema “A” e um onde o sujeito produziu o fonema “P”.

Em cada um destes modelos foram estão presentes oito estruturas de interesse elevado para o fenómeno da gaguez, são elas: maxilar, cartilagem tiroideia, cartilagem cricoide, osso hióide, palato mole, língua, cordas vocais e epiglote.

A obtenção de todas estas estruturas foi feita com o maior cuidado, sendo que todas elas foram processadas através dos softwares referidos anteriormente de forma a atingir os modelos mais viáveis e corretos possíveis.

Torna-se necessário lembrar que a integridade destes modelos é muito importante para a obtenção de resultados corretos, uma vez que o objetivo deste trabalho passa por solicitar o modelo em repouso e chegar assim aos modelos onde se produzem fonemas.

No entanto o simples conhecimento de que estas estruturas estão de acordo com os exames médicos em que foram baseadas não garante necessariamente a integridade dos resultados quando for feita a comparação entre as mesmas estruturas em diferentes situações. Por outras palavras, garantir que, por exemplo, o osso hióide em repouso se pode associar ao osso hióide aquando da produção dos fonemas “a” e “p” requer uma análise entre estas estruturas.

Para verificar a relação entre estas estruturas será feita uma comparação a nível de volume e área superficial das mesmas.

7.5.1 – Verificação usando o volume

Antes de serem apresentados os resultados obtidos é necessário discutir quais os resultados que são expectáveis.

As estruturas humanas não apresentam um volume fixo, uma vez que a maioria das mesmas se pode mover e deformar. Por exemplo, é possível prever que o volume da língua se altere aquando da produção de fonemas, isto deve-se não só à sua deformação para tornar possível a produção do som desejado mas também à maior ou menor irrigação sanguínea da mesma. Por outro lado estruturas ósseas ou cartilagens não devem apresentar grandes alterações de volume.

As medições foram realizadas utilizando novamente o software MIMICS, e os resultados estão apresentados na tabela que se segue.

	Repouso	Fonema “A”	Fonema “P”	Erro	
Estrutura	Volume (mm ³)	Volume (mm ³)	Volume (mm ³)	“A” (%)	“P” (%)
Maxilar	89882,32	89063,90	90492,41	0,91	0,68
Cartilagem tiroideia	3691,83	2623,90	3890,43	28,93	5,38
Cartilagem cricoide	1278,47	1318,44	1152,88	3,13	9,82
Osso hioide	1031,50	939,98	1027,30	8,87	0,41
Palato	5540,83	6660,12	5147,41	20,20	7,10
Língua	70325,24	78127,80	61117,26	11,09	13,09
Cordas vocais	885,39	1075,15	794,44	21,43	10,27
Epiglote	1458,66	2090,31	1334,21	43,30	8,53

Tabela 4 - Comparação de volume entre as estruturas em repouso e em produção de fonemas

Para tornar esta análise mais fácil e intuitiva foi adicionado o erro entre o volume das estruturas em produção de fonemas em comparação com as mesmas em repouso. Este erro é calculado usando a fórmula
$$erro = \frac{\text{volume na produção do fonema} - \text{volume em repouso}}{\text{volume da estrutura em repouso}} \times 100 \quad (6.1).$$

Ao analisar esta informação salta à atenção o facto de o maxilar, tal como seria de esperar, quase não sofre alterações. No entanto há inúmeras estruturas com elevadas alterações de volume que não eram previstas como se passa com a cartilagem tiroideia, o palato as cordas vocais e a epiglote quando da produção do fonema “A”. Sendo que a o aumento em volume de 43% da epiglote é um resultado bastante incrível.

7.5.2 – Verificação usando a área superficial

Tal como na análise através do volume também aqui podem ser feitas algumas previsões. Por exemplo a área superficial de estruturas ósseas não deve apresentar grandes alterações, por outro lado estruturas musculares e de tecido mole onde a irrigação sanguínea é um fator importante devem revelar modificações.

Mais uma vez as medições foram realizadas através do MIMICS e, para facilitar a observação dos resultados foi adicionado o erro entre as estruturas na produção de fonemas e em repouso utilizando a fórmula 6.1 alterando apenas o volume pela área de superfície.

	Repouso	Fonema “A”	Fonema “P”	Erro	
Estrutura	Área (mm ²)	Área (mm ²)	Área (mm ²)	“A” (%)	“P” (%)
Maxilar	45765,44	45745,33	45465,60	0,04	0,65
Cartilagem tiroideia	4860,66	3802,47	5414,60	21,77	11,40
Cartilagem cricoide	1968,95	2004,08	2196,39	1,78	11,55
Osso hioide	1181,59	1266,48	1576,50	7,18	33,42
Palato	3401,43	4111,50	2915,54	20,87	14,28
Língua	27968,11	25937,54	17156,20	7,26	38,66
Cordas vocais	1039,04	1138,64	1042,95	9,58	0,38
Epiglote	1539,16	1917,40	1595,13	24,57	3,631

Tabela 5 -Comparação de área superficial entre as estruturas em repouso e em produção de fonemas

Em primeira análise podemos verificar que existem alterações inesperadas e de valores elevados. Por exemplo a cartilagem tiroideia no fonema “A”, o palato em ambos os modelos, a língua no fonema “P” e a epiglote no fonema “A”. Apesar de as alterações na epiglote e no palato serem esperadas o seu valor acrescido torna-as inesperadas e possivelmente irreais.

7.5.3 – Causas para os erros encontrados

Os resultados apresentados nas secções anteriores põem em causa a continuação deste estudo, no entanto, e como na maioria dos casos, estes erros podem ser justificados e até eliminados.

Várias causas podem ser atribuídas à maioria dos erros encontrados. A primeira causa que é importante referir é o facto de o sujeito ter de se mexer para produzir os fonemas. É do conhecimento geral que em exames médicos como RM e TC a imobilização do paciente é importante, pois pequenos movimentos podem originar artefactos de movimento. Estes artefactos não são mais do que erros nas imagens obtidas, onde uma ou mais estruturas parecem estar em locais onde na realidade não se encontram.

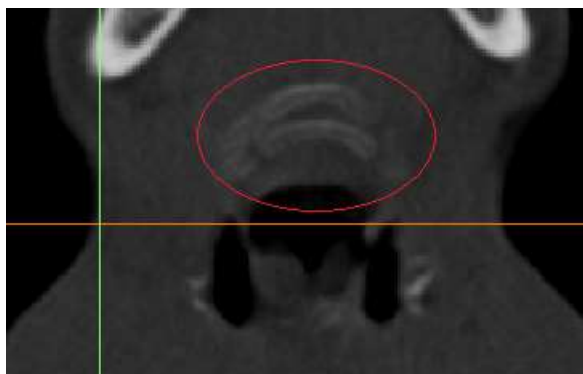


Figura 34 - Exemplo de um artefacto de movimento encontrado onde parecem existir dois ossos hióide

Outro motivo para estes erros passa pela existência de inúmeras estruturas de tecido mole ou cartilagens, estas são mais difíceis de observar e tornam o processo de modelação mais manual. Por sua vez o processo manual está mais sujeito a erros como a seleção de pixéis parasitas.

Por último a resolução das imagens obtidas por ressonância não ser homogênea, possuir uma resolução muito mais elevada num dos planos que nos outros dois, torna a segmentação algo intuitiva e não exata.

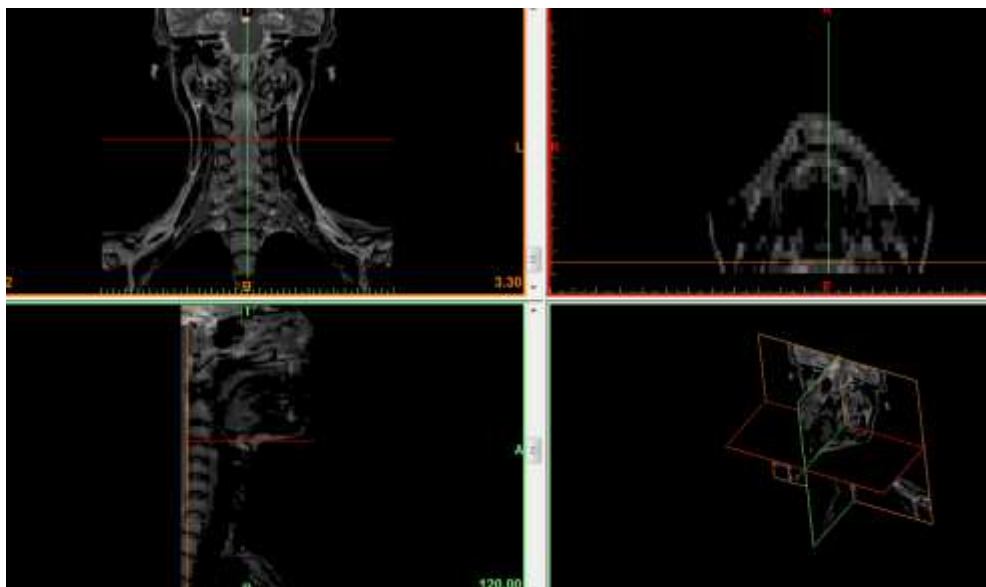


Figura 35 - Imagem ilustrativa da diferença de resolução nos diferentes planos de uma RM

7.6 - Análise final dos modelos obtidos

Após a análise de resultados e de diversas tentativas de os melhorar é inevitável chegar à conclusão que efetivamente os modelos obtidos não são os melhores para uma análise por elementos finitos.

As incoerências encontradas apenas iriam levar a resultados errados que poderiam, por sua vez, levar a conclusões precipitadas e falaciosas.

Assim resta-me dar por terminado o estudo, sendo que o mesmo ficará aquém dos objetivos iniciais. No entanto este trabalho pode ser continuado, tendo em atenção os erros referidos é possível obter modelos com um maior grau de precisão o que permitirá passar à análise por elementos finitos. É de salientar que, obtendo imagens de RM com o mesmo grau de densidade pixéis em todos os planos torna-se possível obter modelos muito mais exatos.

É importante referir ainda que, mesmo com os modelos imperfeitos obtidos, é possível verificar alterações em várias estruturas, como as cordas vocais, língua e epiglote. Isto mostra que a análise de modelos assim obtidos pode levar a conclusões interessantes sobre o fenómeno da gaguez.

8 Conclusões e trabalhos futuros

A produção de voz é uma ferramenta de elevada importância para o dia-a-dia do ser humano, pois é através desta que conseguimos passar informação e manter relacionamentos com outros indivíduos.

Devido à sua relevância a produção de voz tem sido muito estudada a nível da medicina, assim é-nos possível saber as estruturas anatómicas que estão envolvidas neste processo e as funções que as mesmas desempenham no processo. Foi também estudada a função do cérebro no comando destas estruturas, o que nos permite conhecer todo o desenvolvimento desde o primeiro pensamento do que queremos dizer até à produção do som.

Dada a sua importância, seria espectável que o fenómeno da gaguez estivesse perfeitamente estudado, uma vez que esta patologia afeta de uma forma bastante profunda o decorrer normal da vida do sujeito, podendo trazer consequências graves. No entanto o conhecimento que possuímos sobre a gaguez é ainda bastante reduzido, é certo que podemos apontar algumas causas, sendo a maioria uma questão de genética, e conseguimos tratar alguns destes casos com terapia da fala. A verdadeira fonte de conhecimento no que toca à gaguez prende-se ao desenvolvimento da mesma desde os primeiros sinais, normalmente em crianças, até ao seu culminar onde está completamente desenvolvida e as alterações psicológicas que esta induz.

Na realidade a gaguez pode afetar imenso a vida de quem sofre da mesma, sensações de vergonha e timidez podem levar a que o indivíduo gago opte por uma vida onde o contacto com outras pessoas seja reduzido, de forma a não ter de comunicar com estes. Estas escolhas de vida muitas vezes não são as ideais nem correspondem aos planos desejados pelo indivíduo o que por sua vez pode levar a estados de depressão.

Todos os problemas trazidos pela gaguez trazem-nos a este estudo, onde se pretendeu estudar um pouco mais este fenómeno do ponto biomecânico. Os avanços quer da medicina quer da engenharia permitem-nos cruzar as duas áreas e usar imagens médicas de TC e RM para criar modelos a três dimensões, que representam as estruturas anatómicas de um sujeito com

elevado detalhe, que podem depois ser estudados recorrendo a ferramentas informáticas evitando assim a necessidade de existir um contacto permanente com o paciente.

Estes modelos foram neste trabalho criados utilizando uma junção de imagens de RM e TC do mesmo sujeito gago, em três estados diferentes: em repouso, na produção do fonema “A” e na produção do fonema “P”. Para cada estado foram criados, usando o software MIMICS, modelos das estruturas mais relevantes na produção da fala (língua, palato, maxilar, epiglote, cartilagem tiroideia, cartilagem cricoide, cordas vocais e osso hióide).

Desde logo, ao criar estes modelos, é possível retirar algumas conclusões interessantes, nomeadamente o facto de utilizando este processo ser possível perceber os movimentos que foram utilizados para produzir fonemas, como abertura das cordas vocais, enrolamento da língua e movimentos da epiglote. A capacidade de perceber estas alterações mostra que se a nossa compreensão do fenómeno da produção de fala for elevada podemos solicitar o modelo em repouso levando ao estado em que se encontra aquando da produção de fonemas.

É sabido em engenharia que se for possível levar algo de um estado de repouso para outro estado através de solicitações conhecidas é possível calcular os estados intermédios e várias grandezas que poderão ter interesse no estudo, neste caso, da gaguez. Efetivamente grandezas como tensões e deformações e os locais onde estas se encontram seriam relevantes no estudo desta patologia.

Apesar da sua importância e de ser um tópico bastante interessante, esta parte não foi realizada neste trabalho. Isto porque os modelos criados foram comparados entre si, por forma a garantir a integridade dos mesmos. Os resultados obtidos foram decepcionantes, pois a maioria das estruturas sofria alterações a nível de volume e área superficial muito superiores aos esperados o que mostrou que apesar de eles se encontrarem em concordância com os exames em que foram baseados não se encontravam corretamente relacionados como se fossem do mesmo paciente.

Esta conclusão levou à procura de erros que pudessem ter sido cometidos na realização dos modelos e, nesta busca foram atingidas algumas conclusões, também elas interessantes, para um futuro estudo baseado em modelos obtidos de imagiologia médica.

O principal e maior problema deste método é o facto de para produzir fonemas o indivíduo ter de se mexer, estes movimentos por pequenos que sejam alteram as imagens médicas, colocando estruturas onde elas não existem e por vezes com formas que em nada correspondem à realidade.

Outro problema encontrado prende-se à existência de muitas estruturas de tecido mole envolvidas na produção da fala. Estas estruturas são mais difíceis de observar e seleccionar e levam a que muitas vezes o seu processo de segmentação seja completamente manual e até intuitivo. Obviamente este processo leva a erros que podem ser muito difíceis de identificar.

Por fim, o último problema observado prende-se a uma technicalidade das imagens obtidas por RM. Estas imagens são as ideais para observar estruturas de tecido mole, no entanto as imagens fornecidas para este trabalho, possuem uma resolução elevadíssima num dos planos de leitura e resoluções muito baixas nos outros planos. Apesar de serem o tipo mais comum de imagens por RM, estas são de difícil leitura aquando do processo de criação de modelos.

No futuro todo este trabalho poderá ser melhorado fazendo algumas alterações, nomeadamente partir dos modelos criados como referência e tentar obter novos modelos usando novas imagens médicas do mesmo sujeito. É possível que novas imagens apresentem menos artefactos de movimento e possam ser mais exatas, sendo que o ideal seria obter imagens por RM com a mesma resolução em todos os planos. Estas imagens permitiriam fazer uma segmentação muito mais detalhada e perfeita.

Tendo finalmente os modelos mais perfeitos que se conseguir obter seria um trabalho interessante fazer a modelação, através de elementos finitos, do modelo em repouso por forma a chegar aos modelos na produção de fonemas e analisar todo o processo. Os resultados daqui retirados trariam certamente noções importantes para o fenómeno da gaguez e quem sabe, até novas formas de realizar o tratamento da mesma.

Em suma o trabalho aqui realizado não chegou ao patamar desejado, no entanto foi provado que o estudo biomecânico da gaguez é possível e foram até encontradas soluções para o tornar mais viável. Em trabalhos futuros este estudo pode ser usado como referência permitindo assim resultados mais viáveis para os avanços no conhecimento da gaguez, o que, por sua vez, pode culminar na melhoria de vida de todas as pessoas que sofrem desta patologia.

9 Bibliografia

1. Araújo, André; Santos, Ricardo; *Técnica Vocal*; documentos de apoio às aulas, ESTSP 2011
2. Largo, Brito; *Etiologia da Gaguez*; documentos de apoio às aulas, ESTSP 2010
3. Fundação de Otorrinolaringologia;
http://www.forl.org.br/infodoencas_detalhes.asp?id=6; acesso em 27/05/2015
4. Mayo Clinic;
<http://www.mayoclinic.org/diseasesconditions/stuttering/basics/causes/con-20032854>;
acesso em 28/05/2015
5. Associação Portuguesa de Gagos, Perguntas frequentes;
<http://gaguez-apg.com/index.php/gaguez/perguntas-frequentes>; acesso em 24/02/2015
6. E. Caballo, Vicent; Simón, Miguel Ángel; *Manual de psicologia clínica infantil e do adolescente*, São Paulo, Santos Editora 2005
7. Largo, Brito; *Íncio e desenvolvimento da gaguez*; documentos de apoio às aulas, ESTSP 2010
8. Imagens Médicas Integradas;
<http://www.imi.pt/pt/content/17-servios/83-o-que-a-tac?main=18¤t=69>;
acesso em 15/04/2015

9. Dr. Campos Costa;
<http://www.drcamposcosta.pt/Content/A+Dr+Campos+Costa/O+que+e+a+TAC>;
 acesso em 15/04/2015

10. Wikipédia, Imagem por ressonância magnética;
http://pt.wikipedia.org/wiki/Imagem_por_resson%C3%A2ncia_magn%C3%A9tica;
 acesso em 15/04/2015

11. Imagens Médicas Integradas;
<http://www.imi.pt/pt/content/17-servios/92-o-que-a-ressonnciamagntica?main=18¤t=71>;
 acesso em 15/04/2015

12. Szabelska, Elzbieta; Kruczynska, Anna; *Computer-based speech Analysis in stutter*. Applied Computer Science, 2013

13. Badin, Pierre; Bailly, Gérard; Revéret, Lionel; *Three-dimensional linear articulatory modeling of tongue, lips and face, based on MRI and video images*. Journal of Phonetics, 2002 n°30, p. 533-553

14. Bresch, Erik; Narayanan, Shrikanth; *Region segmentation in the frequency domain applied to upper airway real-time magnetic resonance images*. HHS Public Access, 7/02/2015

15. M. Rua, Sandra; R. Freitas, Diamantino; *Modelos morfológicos tridimensionais por IRM do trato vocal para as principais vogais do português europeu*. CMNE/CILAMCE, 15/06/2007.

16. Kim, Yoon-Chul; I. Proctor, Michael; S.Narayanan; Shrikanth; S. Nayak, Krishna; *Improved Imaging of lingual articulation using real-time multislice MRI*. NIH public access, 04/2012

17. Gick, Bryan; Anderson, Peter; *Speech function of the oropharyngeal isthmus: a modelling study*. Taylor & Francis, 05/02/2014

18. Woo, Jonghye; Lee, Junghoon; *A high-resolution atlas and statistical model of the vocal tract from structural MRI*. HHS public access, 14/06/2014

19. Narayanan, Shrikanth; Bresch, Erik; *A multimodal real-time MRI articulatoru corpus for speech research*. Interspeech 2011.
20. Materialize, Software and services for biomedical engineering
<http://biomedical.materialise.com/mimics>; acesso em 05/08/15
21. Materialize, Software and services for biomedical engineering
<http://software.materialise.com/3-maticSTL>; acesso em 05/08/15